

T H E S E

PRESENTEE

A L'UNIVERSITE DE PARIS VI

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE
(mention Sciences)

par

Claude ANDRIEUX

SPECTROMETRIE GAMMA DANS LES FORAGES AVEC UN SEMICTEUR Ge (Li)
APPLICATION A LA MESURE DE LA TENEUR EN URANIUM DES ROCHES

Soutenue le 21 juin 1972, devant la Commission d'Examen

MM. GLANGEAUD

Président

UEBERSFELD

FURET

Examineurs

LETOLLE

DUMESNIL

Invité

T H E S E

PRESENTEE

A L'UNIVERSITE DE PARIS VI

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

(mention Sciences)

par

Claude ANDRIEUX

SPECTROMETRIE GAMMA DANS LES FORAGES AVEC UN SEMICTEUR Ge (Li)

APPLICATION A LA MESURE DE LA TENEUR EN URANIUM DES ROCHES

Soutenue le 21 juin 1972, devant la Commission d'Examen

MM. GLANGEAUD

Président

UEBERSFELD

FURET

Examineurs

LETOLLE

DUMESNIL

Invité



J'exprime ma respectueuse reconnaissance à Monsieur le Professeur L. GLANGEAUD, Membre de l'Institut, pour l'honneur qu'il m'a fait en patronnant cette thèse et en acceptant de présider la Commission d'examen.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur le Professeur UEBERSFELD ainsi qu'à Monsieur J. FURET, qui ont accepté de faire partie du jury.

Je remercie vivement Monsieur R. LETOLLE qui a orienté mes recherches et m'a toujours fourni l'appui de ses conseils.

J'exprime ma plus sincère gratitude à Monsieur P. DUMESNIL qui, tout au long de ce travail, m'a constamment fourni l'aide précieuse de sa compétence et de son amitié.

Je remercie Monsieur M. DOIREAU, et Monsieur J. WEILL, Chef des Services d'Electronique du C.E.N.-SACLAY, qui m'ont autorisé à effectuer ces recherches.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur P. DESNEIGES, Chef du Service d'Electronique de Support Général, à Monsieur J. POTTIER, Chef du Service d'Electronique pour la Recherche et les Applications, ainsi qu'à Monsieur J. GUITTON qui m'ont fourni les moyens de mener à bien ce travail.

J'adresse mes remerciements chaleureux à mes collègues des Services d'Electronique de Saclay et en particulier à Messieurs J. TANGUY, M. HOCLET, et A. LORIN, ainsi qu'à Messieurs Y. WACONGNE et J. LAFAYE pour l'aide amicale qu'ils m'ont constamment apportée.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547107_0002

TABLE DES MATIERES

	Pages
INTRODUCTION	5
1 - PRINCIPES DE MESURES ADOPTES POUR LA DETERMINATION DES TENEURS EN URANIUM	7
1.1 - Choix du détecteur	7
2 - DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE	10
2.1 - La sonde	10
2.1.1 - La réserve d'azote liquide	
2.1.2 - La chambre du détecteur	
2.1.3 - Les circuits électroniques	
2.1.4 - Maintenance de la sonde en azote liquide	
2.2 - Le treuil	15
2.3 - Le détecteur et la chaîne de mesure associée	16
2.3.1 - Le détecteur Ge Li	
2.3.2 - Le préamplificateur de charges	
2.3.3 - L'alimentation haute tension	
2.3.4 - L'amplificateur	
2.3.5 - Le convertisseur et le bloc mémoire	
2.3.6 - L'enregistrement sur perforatrice de bande	
3 - MISE EN OEUVRE DE L'APPAREILLAGE SUR LE TERRAIN	23
4 - MESURES DANS LES FORAGES	23
4.1 - Méthode et conditions de mesure	26
5 - INTERPRETATIONS DES MESURES SPECTROMETRIQUES	26
5.1 - Introduction	26
5.2 - Calcul des teneurs en uranium	30
5.3 - Etalonnages	34
6 - TRAITEMENT AUTOMATIQUE DES DONNEES	36
6.1 - Programme de calcul des aires des pics	36
6.2 - Programme de calcul des teneurs	37

	Pages
7 - RESULTATS	38
8 - ADAPTATION DU MATERIEL ET DE LA METHODE A UNE UTILISATION SYSTEMATIQUE	41
8.1 - Modifications de la sonde	
8.2 - Modifications de la chaîne de mesure	
9 - AUTRES APPLICATIONS POSSIBLES DE LA SONDE Ge Li	44
10 - CONCLUSION	45
ANNEXE I : Traitement d'un spectre par le programme ANASPE - Exemple de résultats.	49
ANNEXE II : Programme de calcul des teneurs à partir des aires des pics.	53
ANNEXE III : Géologie du bassin de Lodève.	61
BIBLIOGRAPHIE	73

SPECTROMETRIE GAMMA DANS LES FORAGES AVEC UN SEMICTEUR Ge (Li)

APPLICATION A LA MESURE DE LA TENEUR EN URANIUM DES ROCHES

INTRODUCTION

Un gisement d'uranium peut être défini par une masse de minerai de teneur variable. Son exploitation dépend des conditions économiques, lesquelles sont fonction :

- des teneurs du minerai en place,
- de l'exploitabilité (accès, transport, traitement),
- des réserves qui sont définies à partir des deux paramètres précédents, au-dessus d'une teneur limite appelée teneur de coupure.

Il est donc très important, dès la reconnaissance d'un gisement, de mesurer la teneur des roches en place.

En examinant le schéma représentant la filiation de l'uranium et les énergies des photons émis par cette famille radioactive à l'équilibre, on constate que la quasi-totalité des photons gamma mesurés provient du bismuth 214 (RaC). La mesure de la teneur en uranium serait cependant relativement aisée, si l'on ne se trouvait le plus souvent, devant des états d'équilibre uranium/radium variables, ce qui interdit l'interprétation directe de l'activité gamma qui, de ce fait, n'est pas proportionnelle à la teneur en uranium des roches.

Les méthodes actuelles de mesure des teneurs en uranium sont principalement :

- Les mesures sur échantillons (carottes), à savoir l'analyse chimique et la méthode THOMMERET.
- La gammamétrie globale (méthode COULOMB).

L'analyse chimique, qui est une méthode rigoureuse et la méthode THOMMERET nécessitent néanmoins l'obtention de carottes ; c'est au niveau du carottage que plusieurs inconvénients apparaissent. Tout d'abord il est nécessaire d'obtenir un bon échantillonnage, or la minéralisation est souvent située dans des zones perturbées et de ce fait, les carottes rencontrées sont souvent fracturées ou quelquefois inexistantes (suivant les cas le taux de récupération des carottes évolue entre quelques pour cent et cent pour cent) ; il faut alors reconstituer les carottes ce qui introduit une source d'erreurs parfois importantes. D'autre part, les carottes ne sont pas toujours considérées comme de bons échantillons de la formation (anomalies ponctuelles, faible volume). Enfin sur le plan économique, le carottage est une opération délicate et chère, elle nécessite un contrôle géologique (examen direct, minéralogique, physique, chimique) et dans le cas de la méthode THOMMERET il

faut prévoir un temps de préparation assez long et un stockage de la préparation de l'ordre de 20 jours pour atteindre l'équilibre radon.

La gammamétrie globale est une méthode mise au point par COULOMB [1][2], elle est maintenant assez largement utilisée. Elle consiste à mesurer, à l'aide de Compteurs Geiger-Muller, l'activité totale gamma dans le forage et à calculer l'"équivalent radium" de l'anomalie.

Ces données sont interprétées à l'aide d'une droite de correspondance "radio-activité-teneur" établie à partir d'analyses chimiques portant sur les carottes ou sur les produits remontés (cuttings) pour les faibles profondeurs. Cette méthode fournit généralement des résultats satisfaisants, mais conduit parfois à des erreurs importantes.

D'autres méthodes sont en cours d'étude à des degrés d'avancement divers. Tout d'abord la méthode "gamma naturel sélectif" élaborée par J.A. CZUBEK [3][4], dont le principe consiste à utiliser l'augmentation du coefficient d'absorption des photons gamma, par effet photoélectrique résultant de la présence de l'uranium dans la roche. Ceci modifie la forme du rayonnement diffusé par le milieu. Ce phénomène est surtout perceptible dans le domaine des basses énergies. Plus précisément, il a été établi que la teneur en uranium, Q_u , pouvait être reliée aux taux de comptage mesurés dans deux domaines énergétiques :

$$I_1 = 100 \text{ à } 133 \text{ keV}$$

$$I_2 = 300 \text{ à } 700 \text{ keV}$$

par la relation

$$\text{Log } \frac{I_1}{I_2} = A + B q_u$$

A et B étant des constantes à déterminer par étalonnage.

Cependant, l'application de cette méthode se heurte à des difficultés pratiques. L'utilisation d'un ensemble de détection comportant un photomultiplicateur exige l'emploi d'un stabilisateur de spectre, calé sur un pic photoélectrique de référence, ce qui nécessite l'incorporation d'une source radioactive de faible activité à la sonde. De plus, la théorie mathématique d'interprétation des diagraphies "gamma naturel sélectif" n'est pas suffisamment avancée pour permettre l'établissement d'un programme d'interprétation automatique par ordinateur.

La méthode d'activation par neutrons pulsés, imaginée par J.A. CZUBEK [5][6], consiste à mesurer la distribution temporelle des neutrons dans la roche après irradiation par une impulsion de neutrons rapides. Les premiers essais ont permis de confirmer les prévisions de la théorie ; en particulier, il est possible de relier le flux de neutrons épithermiques à la teneur en uranium. Cette méthode doit atteindre une précision très satisfaisante (1 % sur la teneur pour un flux de neutrons rapides de quelques 10^9 n.s^{-1}). Elle est néanmoins limitée par l'utilisation d'un générateur de neutrons de faible encombrement, pouvant être intégré dans une sonde. A l'heure actuelle ce type de générateur n'est pas disponible sur le marché et son utilisation conduirait à des investissements élevés.

1 - PRINCIPES DE MESURE ADOPTES POUR LA DETERMINATION DES TENEURS EN URANIUM

Comme il a été dit, plus haut, la teneur en uranium, qui est la seule donnée ayant une importance économique, n'est pas proportionnelle à l'activité gamma de la roche. L'explication de ce fait est la suivante : Les deux isotopes primitifs de l'uranium (^{238}U , abondance actuelle $\approx 99,3\%$ et ^{235}U abondance actuelle $\approx 0,7\%$) sont des émetteurs α qui présentent une faible activité gamma. Cependant, ils donnent chacun naissance à une nombreuse famille radioactive. Comme le montre le spectre effectué avec un détecteur au GeLi (figure 1) l'activité gamma d'un minerai d'uranium provient surtout du ^{214}Bi (RaC) et, dans une moindre mesure du ^{214}Pb (RaB), tous deux descendants de l'uranium 238 par une filiation assez complexe. L'uranium, soluble dans les eaux souterraines possède de grandes facultés de migration [7]. Par contre, les premiers nucléides à longue période auxquels ils donnent naissance (thorium 230 ou ionium et radium 226 en ce qui concerne ^{238}U) sont pratiquement insolubles et demeurent en place. On conçoit donc que certains minerais, riches en radium 226 et aussi par suite en Ra B et Ra C puissent présenter une émission gamma intense, alors qu'une partie de l'uranium originel les a quittés par migration. De même un minerai d'uranium récemment formé peut avoir une teneur élevée et une activité gamma encore faible, les produits de filiation à longue période n'ayant pas encore atteint leur équilibre radioactif.

Pratiquement, l'état d'équilibre d'un minerai est caractérisé symboliquement par la valeur du rapport U/Ra. Quand celle-ci est égale à l'unité, le même nombre de désintégrations surviennent par unité de temps dans l'uranium 238 et le radium 226 contenus dans ce minerai. Pour les minerais usuels la valeur du rapport U/Ra peut varier entre 0,7 et 1,4 [8].

La méthode proposée pour s'affranchir de ce déséquilibre consiste à mesurer l'activité gamma due à l'uranium 235 lui-même, c'est-à-dire au mélange isotopique naturel dont la composition est constante pour tous les échantillons terrestres. Cette activité est caractérisée par l'aire du pic d'absorption totale à 185 keV désignée par S_{185} . En enregistrant des spectres gamma en différents points, régulièrement espacés, de la couche uranifère traversée par le forage, on obtient des valeurs de S_{185} qui sont fonction de la teneur pondérale en uranium Qu. L'interprétation de ces mesures soulève cependant quelques difficultés. Tout d'abord, le radium 226, dont on a vu qu'il n'était pas nécessairement en équilibre avec l'uranium émet des photons d'énergie très voisine de 185 keV. La résolution obtenue avec l'équipement actuel est encore insuffisante pour séparer ces deux raies (^{235}U et ^{226}Ra) distantes seulement de 0,7 keV environ. Le radium 226 n'émettant que cette seule raie de 185 keV, il faut effectuer la correction correspondant à son apport en se basant sur les pics d'absorption totale provenant d'autres nucléides (Ra B et Ra C) qui demeurent toujours en équilibre avec lui. Une autre possibilité consisterait à mesurer l'activité gamma due au $^{234\text{m}}\text{Pa}$ qui provient de l'uranium 238, mais la raie d'émission à 1 001 keV est malheureusement très faible (0,59 %) et nécessite des durées de comptage incompatibles avec la nature des mesures sur le terrain.

1.1 - Choix du détecteur

Jusqu'à présent le développement des mesures de spectrométrie gamma dans les forages était limité par la médiocre résolution en énergie du détecteur le plus

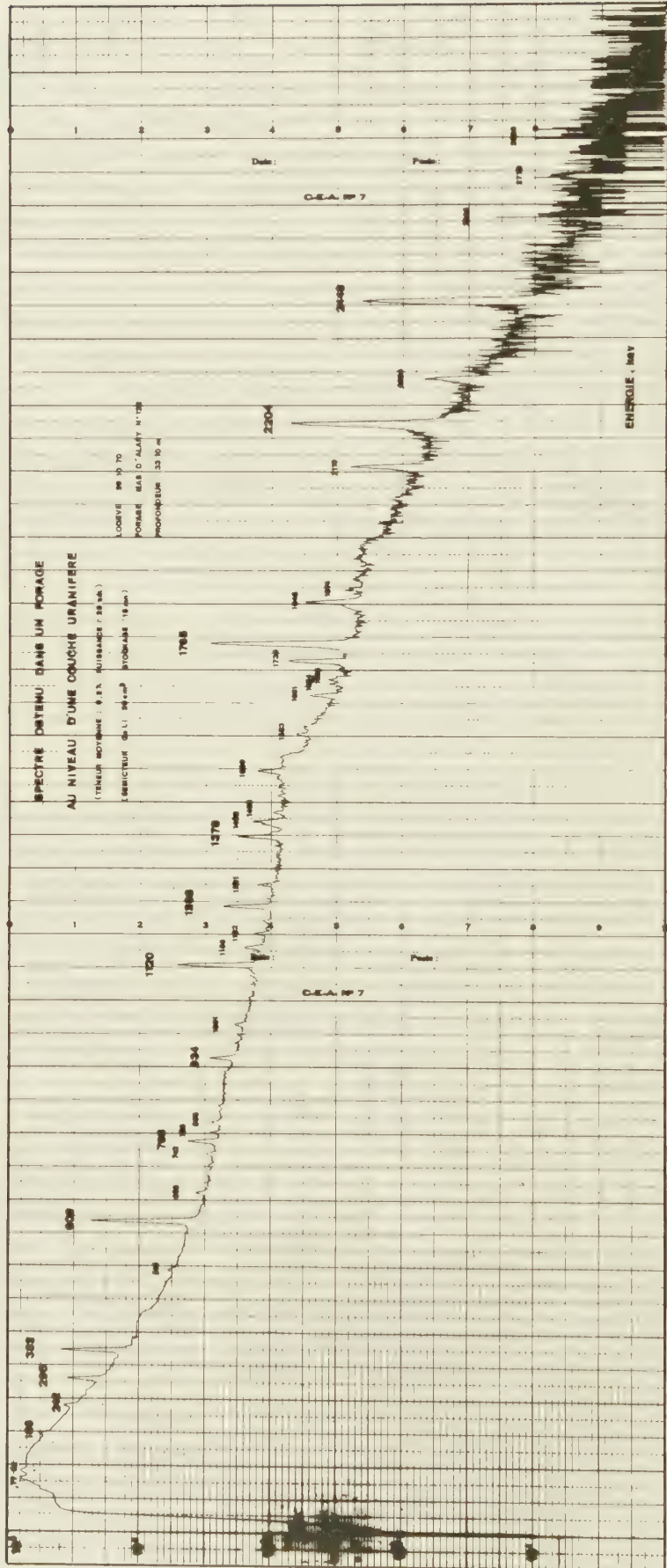


Figure 1

couramment utilisé, le scintillateur NaI(Tl). Grâce aux détecteurs à semiconducteurs, en particulier germanium compensé au lithium, il est maintenant possible de réaliser un appareillage de radio-carottage bénéficiant de l'excellente résolution en énergie de ce type de détecteur et d'envisager de nouvelles méthodes de mesure.

Les figures 2 et 3 illustrent le gain obtenu en finesse d'analyse et montrent les spectres issus de mesures réalisées dans un modèle contenant du minerai d'uranium (teneur 0,5 %) et de dimensions suffisantes pour être assimilé à un forage c'est-à-dire à une géométrie infinie. La figure 2 montre les résultats obtenus avec une sonde scintillométrique (NaI(Tl)), la figure 3 ceux obtenus à l'aide d'une sonde équipée d'un détecteur au germanium-lithium. Notre choix s'est porté sur ce dernier type de détecteur, seul compatible avec la méthode de mesure exposée au paragraphe précédent.

Son utilisation comporte certaines servitudes, en particulier la nécessité de le maintenir à basse température, même en dehors des périodes d'utilisation ce qui a conduit à concevoir un matériel original adapté aux mesures dans les forages.

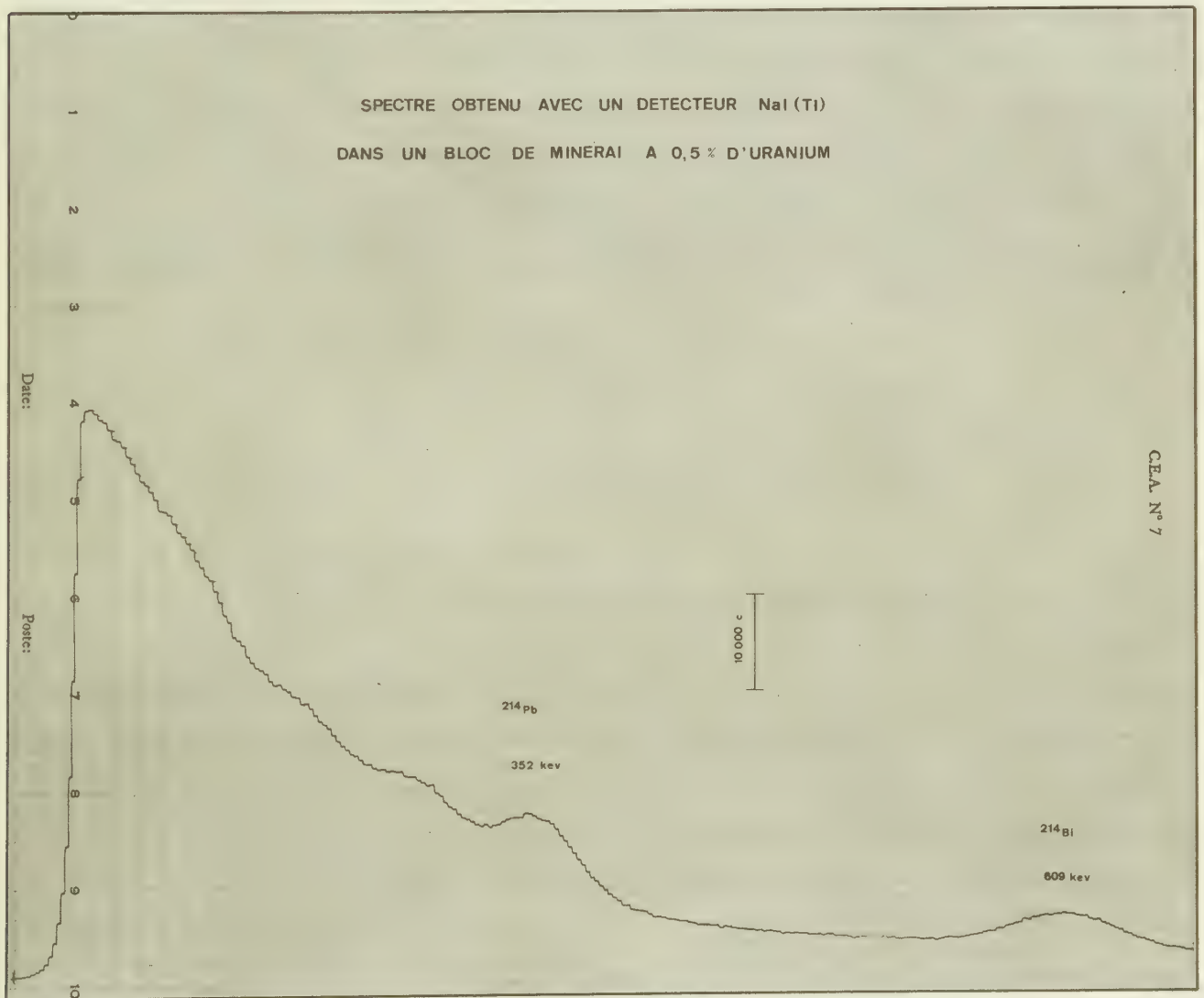


Figure 2

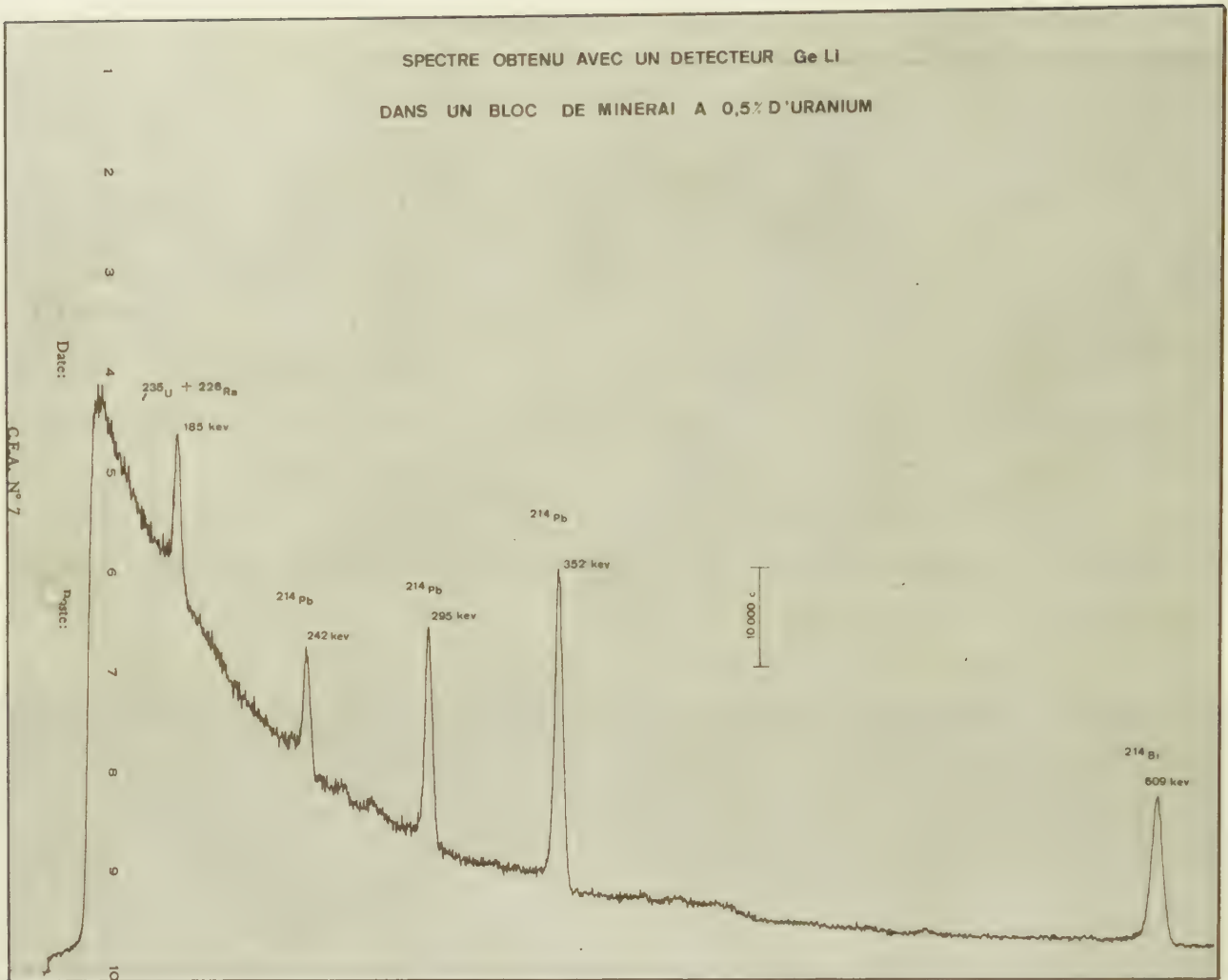


Figure 3

2 - DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE

On peut considérer trois parties principales :

- la sonde
- le treuil
- le détecteur et la chaîne de mesure associée.

2.1 - La sonde

Le diamètre de cette sonde est de 57 mm, il résulte d'un compromis entre les possibilités de réalisations mécaniques et les diamètres courants des forages dans lesquels s'effectueraient les mesures.

La figure 4 représente le schéma de principe de la sonde qui peut être décomposée en trois parties principales :

- la réserve d'azote liquide,
- la chambre du détecteur,
- les circuits électroniques.

2.1.1 - La réserve d'azote liquide

Elle est réalisée à l'aide d'un vase "DEWAR" en acier inoxydable doré inté-

rieurement. Le réservoir intérieur est relié au corps de sonde, au niveau de l'orifice, par un tube dont la longueur a été calculée pour rendre négligeable la fuite thermique.

Le vide de ce DEWAR est réalisé initialement par l'intermédiaire d'un robinet muni d'une soupape de sécurité. Une cartouche, renfermant du charbon actif destiné à entretenir le vide par cryopompage, est placée dans le bas du réservoir. Cette disposition lui permet d'être toujours maintenue à la température de l'azote liquide. Le réservoir est traversé par un tube à double paroi qui est destiné au passage des câbles électriques acheminant les tensions d'alimentation vers les circuits électroniques et remontant les informations issues du détecteur vers la surface. La contenance du réservoir est de l'ordre de deux litres ce qui permet d'obtenir une autonomie de 20 heures environ.

2.1.2 - La chambre du détecteur

Le bon fonctionnement du détecteur nécessite une basse température et le maintien d'un vide propre. L'enceinte utilisée se trouve dans la partie centrale de la sonde. La figure 5 représente le schéma détaillé de la chambre du détecteur. Le cryoduc en cuivre, dont la partie supérieure est immergée dans l'azote liquide, se termine par une embase circulaire destinée à recevoir le détecteur. Dans cette embase on a ménagé une cavité destinée à recevoir le charbon actif assurant le maintien du vide. On peut remarquer que les deux vides (réserve d'azote liquide et chambre du détecteur) sont séparés par un soufflet destiné à absorber les dilatations et contraintes apparaissant lors du passage de la température ambiante à celle de l'azote liquide (-196°C). Trois vis en téflon permettent de centrer le cryoduc tout en limitant les fuites thermiques. A la partie inférieure de l'enceinte on trouve un robinet muni d'une soupape de sécurité, identique à celui disposé à la partie supérieure du réservoir d'azote liquide. L'emploi de telles soupapes de sécurité est indispensable lorsqu'on utilise le charbon actif pour l'entretien du vide. En effet si une microfuite se produit dans l'une des enceintes sous vide, le charbon actif peut adsorber progressivement des quantités considérables de gaz, risquant de provoquer une explosion lors du réchauffement. Un passage isolant, disposé près du robinet à vide, permet de réaliser la liaison avec le détecteur.

2.1.3 - Les circuits électroniques

La partie inférieure de la sonde est réservée au préamplificateur et à l'alimentation haute tension. La liaison entre le détecteur et le préamplificateur doit être particulièrement soignée de manière à obtenir une capacité parasite très réduite et constante. Ces conditions ont été obtenues en utilisant une structure coaxiale comportant un conducteur de faible section, immobilisé dans un tube en téflon blindé par une gaine extérieure en laiton.

2.1.4 - Maintenance de la sonde en azote liquide

Le détecteur choisi (Ge Li) nécessitant d'être conservé à basse température, il importe que le niveau d'azote liquide dans le réservoir de la sonde soit maintenu au-dessus d'une certaine limite de sécurité. La figure 6 montre le dispositif réalisé pour l'alimentation automatique en azote liquide de la sonde.

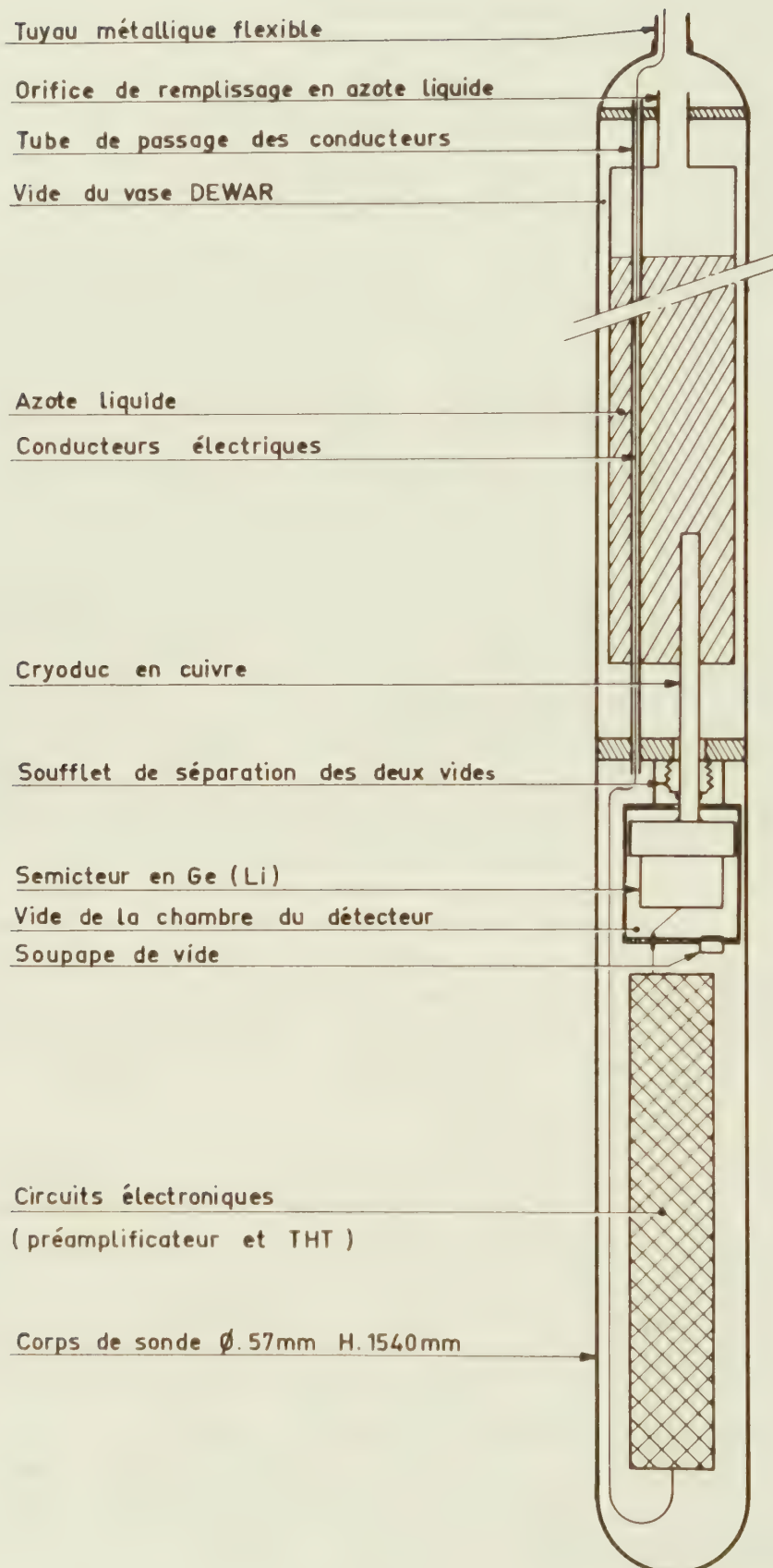


Figure 4 - Sonde spectrométrique à semicteur Ge (Li).

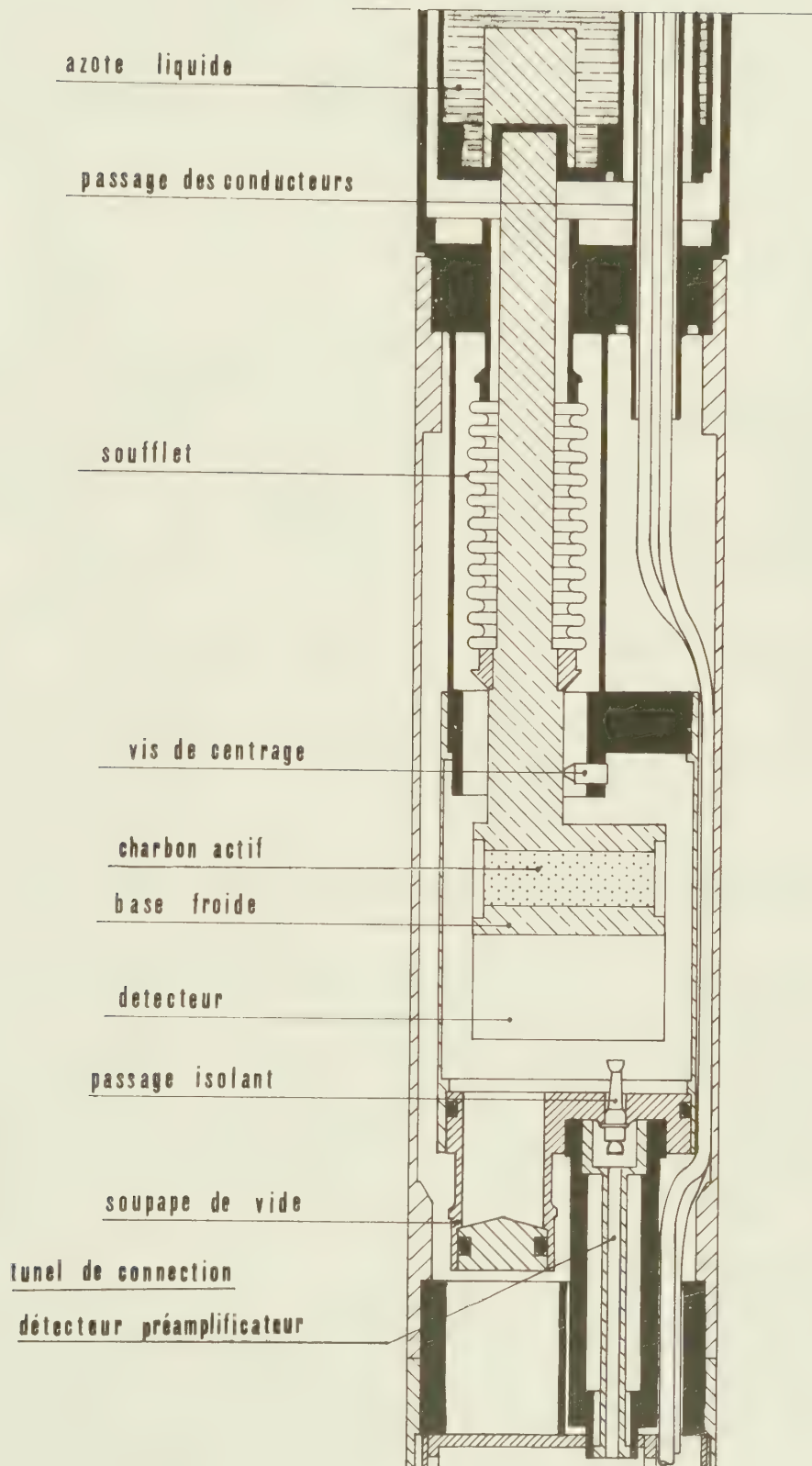


Figure 5 - Chambre du détecteur.

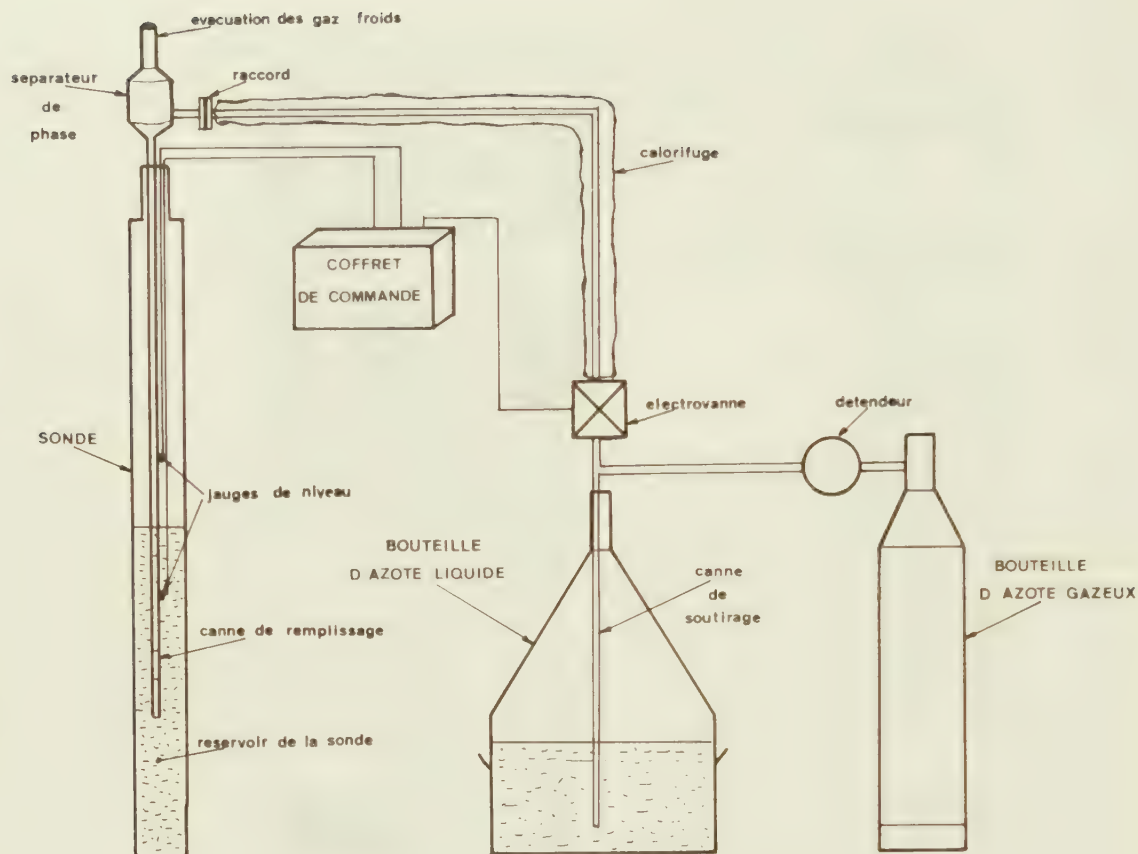


Figure 6 - Dispositif d'alimentation automatique en azote liquide de la sonde.

Une bouteille d'azote liquide est maintenue en légère surpression à partir d'une réserve d'azote gazeux. Une canne de soutirage plonge dans la bouteille d'azote liquide ; elle est reliée, par l'intermédiaire d'une électrovanne et d'un tube souple calorifugé à une canne de remplissage qui plonge dans le réservoir de la sonde. Cette canne comporte à sa partie supérieure un séparateur de phase qui permet au gaz d'évaporation de s'échapper et à l'azote liquide de descendre dans le réservoir de la sonde par gravité. Il importe en effet de ne pas créer de remous dans le réservoir afin d'éviter des projections sur les jauges de niveau ce qui risquerait de provoquer un fonctionnement aléatoire.

Le fonctionnement du système est le suivant : deux jauges de niveau (résistances au carbone) sont disposées le long de la canne de remplissage de la sonde. Ces jauges représentent les niveaux haut et bas de l'azote liquide ; elles commandent l'ouverture ou la fermeture de l'électrovanne. Lorsque le niveau de l'azote liquide descend en-dessous de la jauge inférieure, la valeur de la résistance au carbone de la jauge, varie et actionne par l'intermédiaire du coffret électronique, le relais qui provoque l'ouverture de l'électrovanne. L'azote liquide, maintenue en légère surpression dans la bouteille, se transvase dans le réservoir de la sonde. Lorsque le niveau d'azote liquide atteint la jauge supérieure, celle-ci actionne à nouveau le relais de commande de l'électrovanne et en provoque la fermeture.

2.2 - Le treuil

Deux problèmes, liés à la nature de la sonde, se sont posés lors de l'élaboration du câble et par conséquent lors de la conception du treuil.

L'azote liquide, utilisée dans la sonde, produit en s'évaporant une grande quantité d'azote gazeux (1 litre d'azote liquide produit 646 litres d'azote gazeux dans les conditions TPN). Il est nécessaire d'évacuer ce gaz et nous avons choisi de l'évacuer vers la surface. Les informations issues du préamplificateur de charges doivent être, si l'on veut préserver la bonne résolution en énergie du détecteur, acheminées à l'aide d'un câble coaxial adapté, à ses deux extrémités, sur son impédance caractéristique. Pour satisfaire ces deux conditions, le câble a été réalisé de la façon suivante :

L'évacuation du gaz résultant de l'évaporation de l'azote liquide du cryostat est obtenue grâce à un tuyau métallique souple, genre "TOMBAC" renforcé par une tresse périphérique en fils d'acier inoxydable, utilisée comme élément porteur du câble, et gainée en matière plastique. Les diamètres, interne et externe, de ce tuyau sont respectivement de 11,5 et 20 mm ; sa longueur est actuellement de 95 mètres. Les conducteurs électriques (câble coaxial pour l'acheminement des impulsions, simples fils pour les alimentations basse tension + et - 24 volts) constituent un câble souple, gainé, de diamètre 8 mm et placé à l'intérieur du tuyau d'évacuation de l'azote gazeux.

Le câble ainsi constitué, relié d'une part à la sonde et d'autre part à l'électronique de surface est actionné à l'aide d'un treuil.

L'inconvénient majeur des treuils conventionnels réside dans le fait que les informations sont recueillies sur leur axe à l'aide de collecteurs et de balais. Ce système est incompatible avec la nature des informations délivrées par le préamplificateur de charges, car il est générateur de mauvais contacts et n'assure pas la continuité d'impédance qu'exige la bonne utilisation des câbles coaxiaux. Pour cette raison le treuil utilisé a été conçu en s'inspirant du principe du palan différentiel, ce qui permet un raccordement fixe au niveau de son axe.

Comme le montre la figure 7, le treuil est composé d'un tambour extérieur sur lequel est enroulé le câble genre "TOMBAC" renfermant le câble électrique. A proximité de l'une des flasques et à une extrémité du câble porteur, le câble électrique pénètre à l'intérieur du tambour extérieur, pour aller s'enrouler sur un second tambour de diamètre beaucoup plus faible, désigné sur la figure par "tambour du câble électrique". Le câble passe ensuite sur une moufle constituée par deux séries de poulies disposées sur deux axes parallèles qui vont, en fonction du déroulement du câble porteur sur le tambour extérieur, soit se rapprocher soit s'écarter l'un de l'autre.

Le fonctionnement peut être résumé comme suit : lorsque le câble porteur est enroulé sur le tambour extérieur, cas de la figure 6, le câble électrique se trouve emmagasiné entre les poulies dont les axes sont à l'écartement maximal. Lorsque le câble porteur se dévide du tambour extérieur, les axes de la moufle se rapprochent et le câble électrique s'enroule sur le petit tambour interne. On voit que dans ces conditions, les extrémités du câble sont fixes et peuvent être raccordées par des connecteurs coaxiaux usuels.

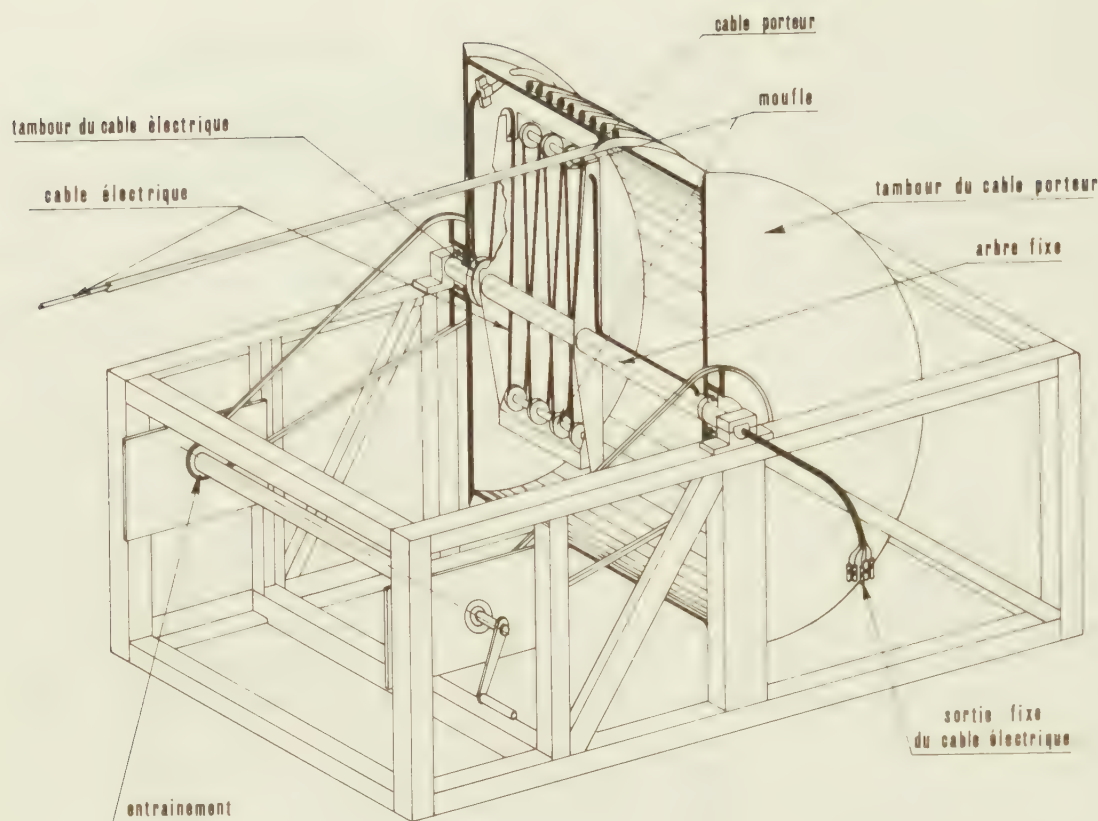


Figure 7 - Treuil

2.3 - Le détecteur et la chaîne de mesure associée

La figure 8 montre le bloc diagramme de la chaîne de mesure. Seuls, le détecteur, son préamplificateur et l'alimentation haute tension sont incorporés dans la sonde. Les impulsions issues du préamplificateur sont acheminées sous forme analogique vers la surface.

2.3.1 - Le détecteur

Il est du type "germanium compensé au lithium". On peut rappeler qu'il se compose d'un cristal à haute résistivité placé entre deux zones conductrices N et P, constituées respectivement d'un excès d'ions lithium dans le cristal et d'une diffusion d'atomes accepteurs (aluminium, indium, etc...).

Le principe de fonctionnement s'apparente à celui d'une chambre d'ionisation. Un photon gamma pénétrant dans le cristal semiconducteur peut y subir trois principaux types d'interaction :

a) effet photoélectrique : le photon cède pratiquement toute son énergie à un électron.

b) effet COMPTON : le photon incident cède une partie de son énergie à un électron. Il existe un photon diffusé qui peut soit être à nouveau absorbé, soit sortir du détecteur.

c) effet de paires : si l'énergie du photon incident est supérieure ou égale

à 1,02 MeV, il peut être absorbé en créant un électron et un positon. Ce dernier s'annihile par interaction avec un électron en donnant naissance à deux photons de 511 keV. Le phénomène est donc plus complexe mais peu important sur le plan pratique en raison de sa rareté. Quelle que soit leur origine, les électrons primaires dissipent leur énergie dans le germanium en créant des paires "électron-trou". Dans le cas du germanium, l'énergie nécessaire est de l'ordre de 3 eV par paire.

Il faut noter qu'elle est beaucoup plus faible que l'énergie nécessaire pour ioniser le gaz d'une chambre d'ionisation (de l'ordre de 35 eV dans l'air). Ce fait contribue à expliquer la bonne résolution obtenue.

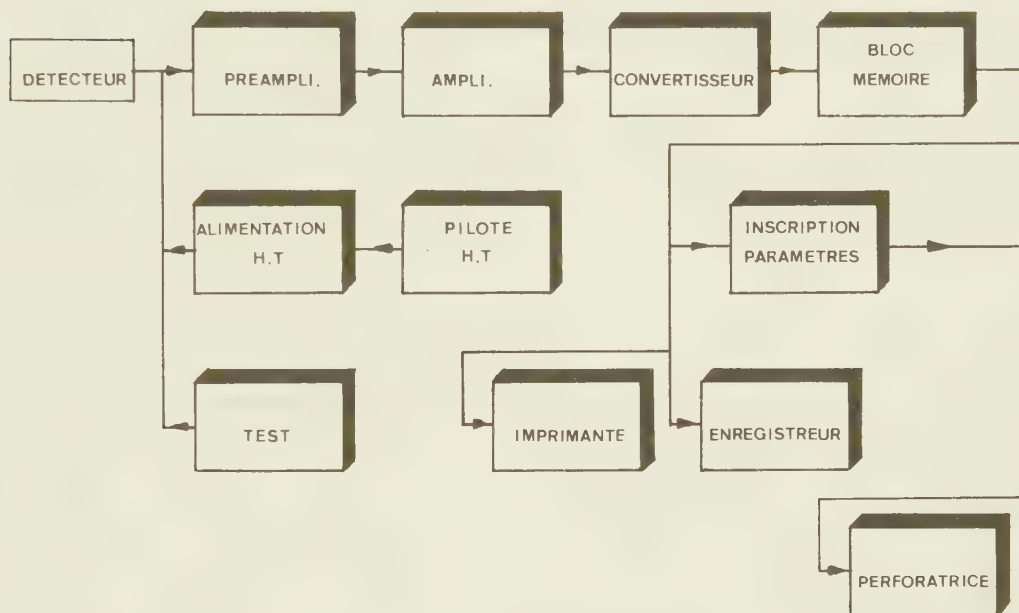


Figure 8 - Bloc diagramme de la chaîne de mesure

Les charges ainsi créées sont séparées par le champ électrique élevé qui règne dans la zone intrinsèque (de l'ordre de $1\,000\text{ V.cm}^{-1}$) puis collectées par les électrodes qui recueillent une quantité d'électricité Q qui est proportionnelle à l'énergie du photon incident dans le cas de l'effet photoélectrique et généralement inférieure dans les autres cas possibles. Ceci explique que les spectres obtenus présentent, outre les pics d'absorption totale dus principalement à l'effet photoélectrique et correspondant aux énergies gamma primaires, un fond diffusé important. Bien entendu la tension de polarisation doit avoir une valeur suffisante pour assurer une collection complète des paires "électron-trou". Le temps nécessaire à l'accomplissement des phénomènes d'interaction, d'ionisation et de collection est de l'ordre de 5.10^{-11} s .

Les caractéristiques du détecteur utilisé sont les suivantes :

- Type : Ge Li
- Structure : coaxiale non percée

- Dimensions : diamètre : 32 mm, hauteur : 28,5 mm
- Volume : 21,8 cm³.

Ce détecteur a été fabriqué aux Services d'Electronique de Saclay à partir d'un barreau de germanium de caractéristiques :

- Résistivité : 11 à 17 $\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$
- Durée de vie des porteurs : $460 \cdot 10^{-3}$ s
- Nombre de dislocations : 2 100 à 2 400 par cm².

2.3.2 - Le préamplificateur de charges

La but du préamplificateur associé à un détecteur à semiconducteur est de délivrer une impulsion de tension proportionnelle à la charge libérée dans le détecteur.

Il est de plus, nécessaire que cette impulsion soit délivrée sous une faible impédance, de façon à pouvoir être aisément acheminée vers l'amplificateur (notons que dans notre chaîne de mesure, la liaison entre la sortie du préamplificateur et l'amplificateur s'effectue à l'aide d'un câble coaxial de 130 m de long).

La conversion charge/impulsion de tension peut être réalisée soit par un circuit passif extérieur précédant un préamplificateur sensible à la tension, soit par le préamplificateur lui-même qui, dans ce cas, est sensible à la charge ; sa fonction de transfert s'exprime alors en volt/Coulomb. Ce type de préamplificateur possède en outre l'avantage de délivrer (sous réserve que son gain en boucle ouverte soit grand, $>1\ 000$), une impulsion de sortie pratiquement indépendante des variations de capacité du détecteur. La figure 9 montre le schéma de principe d'un préamplificateur sensible à la charge à liaison capacitive. La réponse de ce circuit à une charge Q est de la forme :

$$V_S = \frac{Q}{C_1} e^{-t/R_1 C_1}$$

où : V_S est la tension de sortie

C_1 la capacité de contre-réaction

R_1 la résistance de contre-réaction

Q la charge appliquée à l'entrée.

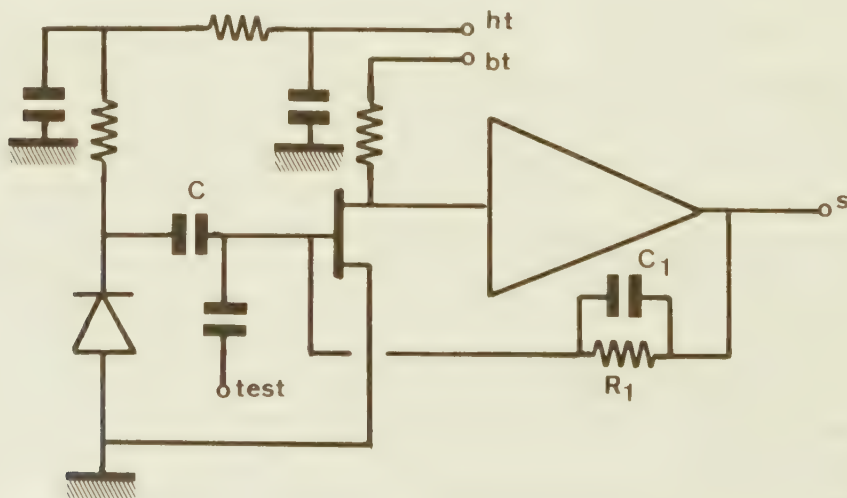


Figure 9 - Préamplificateur
Schéma de principe.

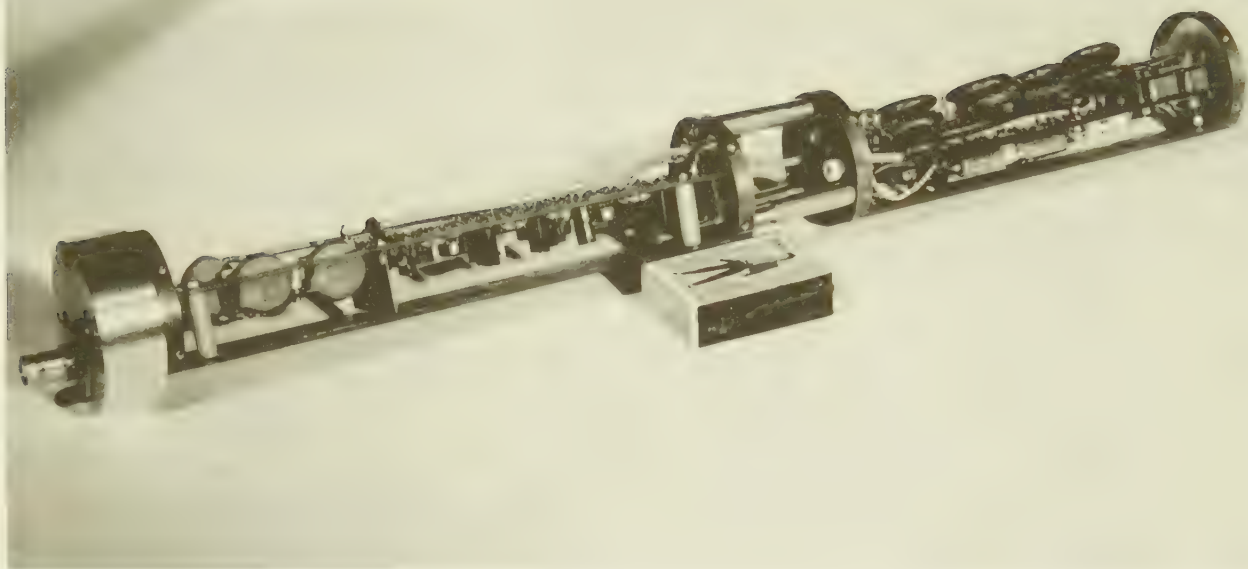


Figure 11 - Vue de l'ensemble "préampli-Haute tension"

2.3.3 - L'alimentation haute tension

L'utilisation d'un préamplificateur de charges, ayant comme élément d'entrée un transistor à effet champ, exige le plus souvent (dans les montages traditionnels des détecteurs à semiconducteurs) l'emploi d'une alimentation haute tension de caractéristiques un peu particulières. Il importe, en effet, pour ne pas détruire le transistor d'entrée, d'établir ou de couper la polarisation du détecteur d'une façon lente et progressive. L'impédance d'entrée de ce transistor est grande (quelques $10^{11} \Omega$) et la tension de claquage "grille-source" n'est que de quelques dizaines de volts ; aussi une variation un peu rapide de la haute tension engendrant une impulsion de courant lui serait fatale.

Compte tenu du fait qu'il était impensable d'acheminer la haute tension par le câble (problèmes d'isolement, de microclaquages, de sécurité, etc...) et que la place disponible dans la sonde ne permettait pas l'utilisation de circuits standard il a été nécessaire d'étudier une alimentation haute tension bien adaptée à ces conditions (faible encombrement, commande depuis la surface). Après examen de plusieurs solutions, le système suivant a été retenu : (figure 12).

Un circuit "pilote" délivre un signal récurrent de fréquence fixe. Ce signal est appliqué à un transistor d'amplification couplé au circuit élévateur de tension.

Le circuit pilote est constitué par un oscillateur utilisant un réseau de déphasage en pont, couplé à un étage d'amplification à l'aide d'un transistor monté en "émetteur-suiveur" ce qui permet de s'affranchir des variations de charge. Ce circuit possède une excellente stabilité en fréquence (on a noté 0,1 % de variation dans la gamme de température de -10°C à $+55^{\circ}\text{C}$). Le signal issu du circuit pilote est

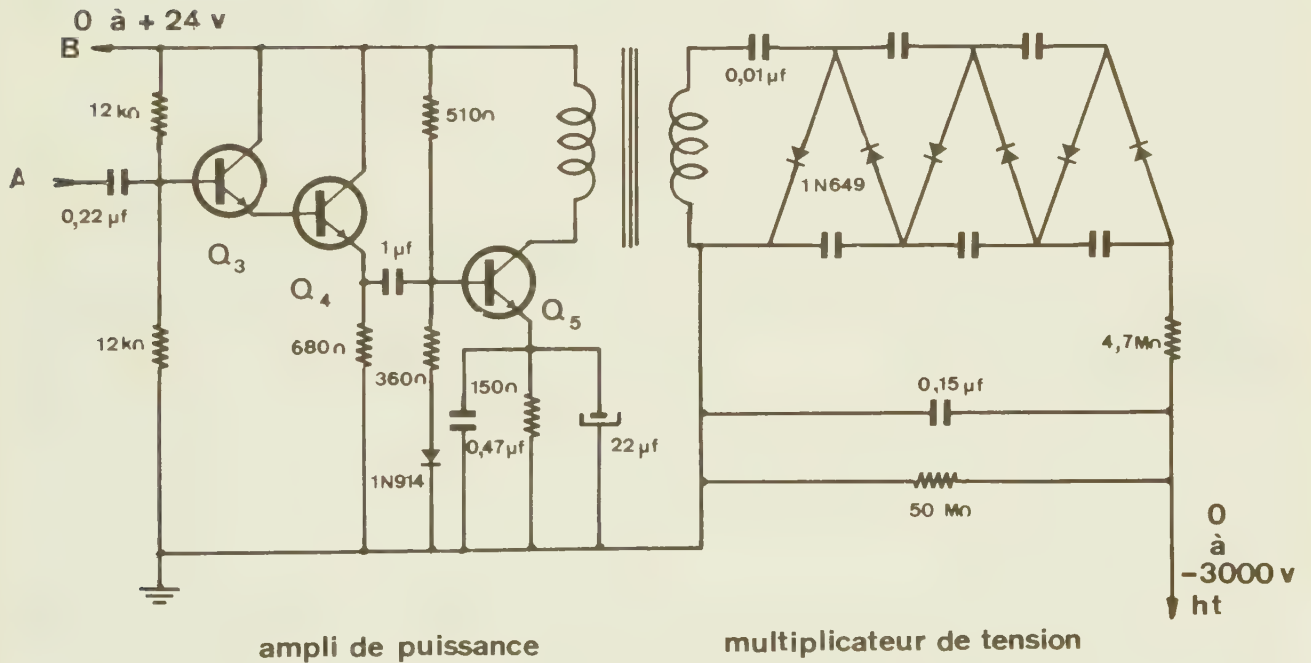
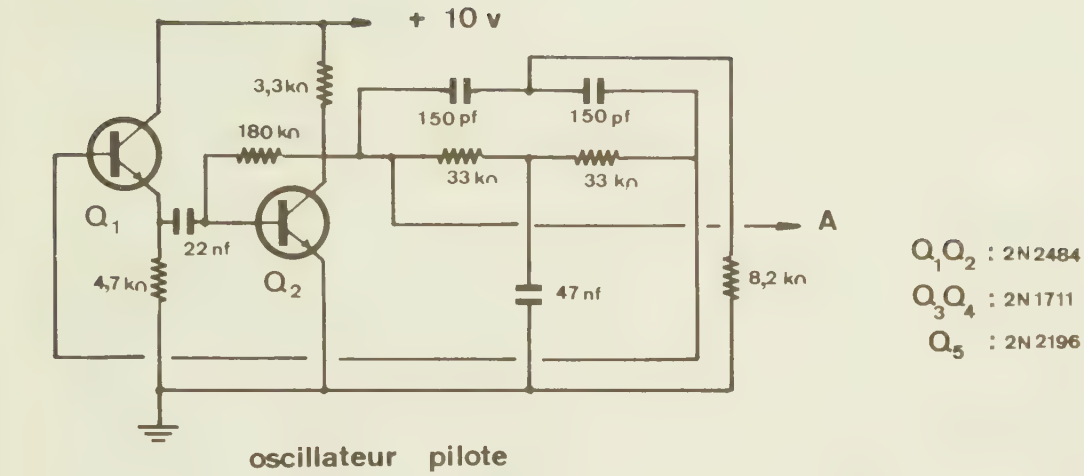


Figure 12 - Alimentation haute tension

appliqué sous une faible impédance au transistor Q5 dont la charge est constituée par l'enroulement primaire d'un transformateur élévateur de tension. L'alimentation des transistors Q3, Q4, Q5 s'effectue depuis la surface. Dans ces conditions le transistor d'amplification va fournir au primaire du transformateur des impulsions de fréquence fixe et d'amplitude fonction de la tension de commande. Les caractéristiques principales de cette alimentation sont les suivantes :

- Haute tension délivrée : 0 à 3 000 volts, débit 50 μ A pour une tension de commande de 0 à 24 volts ($I_{\max} = 100$ mA).
- Stabilité en fonction du temps : meilleure que 10^{-3} en 8 heures.

2.3.4 - L'amplificateur

Du type MAPS 10, il est composé de deux sous-ensembles :

MAP 13 : amplificateur de gain réglable (1 à 128) et un réseau de différentiation.
MAMF 13 : essentiellement composé de réseaux de filtrage (différentiation et intégration) destiné à limiter la bande passante et à optimiser le rapport signal/bruit.

Lors des mesures sur le terrain les valeurs des constantes de temps ont été fixées : $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 1,6$ μ s.

Cette valeur a été déterminée expérimentalement. Contrairement aux mesures en laboratoire où l'on peut, en fonction des taux de comptage, optimiser les valeurs des constantes de temps, il est nécessaire lors des mesures dans les forages, où le taux de comptage varie très vite, de déterminer des valeurs de constantes de temps fixes compatibles avec les valeurs extrêmes du taux de comptage.

2.3.5 - Le convertisseur et le bloc mémoire

La conversion amplitude-temps et le codage temps-numérique sont assurés par un ensemble type CA 13. Les impulsions codées sont alors stockées dans une mémoire à tores de ferrite de 4 096 canaux et de capacité 10^5 par canal. Le bloc d'exploitation utilisé est le BM 96. La sortie des résultats peut être réalisée de différentes manières ; il existe en fait trois possibilités :

- Enregistreur potentiométrique : permet d'obtenir un tracé du spectre obtenu à des fins d'examen qualitatif.
- Imprimante : permet d'obtenir le contenu de chaque canal mais conduit à un dépouillement très fastidieux dans le cas d'un analyseur à plusieurs milliers de canaux.
- Perforatrice de bande : cette solution a été systématiquement utilisée car elle permet d'obtenir le contenu des canaux sous une forme compatible avec le traitement ultérieur des résultats sur ordinateur.

2.3.6 - L'enregistrement sur perforatrice de bande

D'une façon générale la perforatrice (TALLY) est utilisée directement en sortie du bloc d'exploitation BM 96, on obtient alors sur la bande perforée le contenu des canaux de l'analyseur, mais sans identification du spectre. Lors des mesures sur le terrain, il est nécessaire d'enregistrer avant le contenu des canaux, un certain nombre de paramètres permettant l'identification du spectre ainsi que les

données indispensables au traitement ultérieur. Une interface réalisée à partir d'éléments standard "STDAN" ainsi qu'un châssis comprenant les circuits d'affichage et quatre groupes de contacteurs rotatifs permet l'introduction des paramètres suivants :

- Date et heure de début de spectre
- Numéro du forage
- Durée de stockage
- Profondeur.

3 - MISE EN OEUVRE DE L'APPAREILLAGE SUR LE TERRAIN

Il était impensable, au niveau de la mise au point de la méthode, de construire une chaîne de mesure spécifique à l'utilisation sur le terrain. Aussi comme il a été indiqué au paragraphe 2.3 l'électronique de mesure est essentiellement constituée par du matériel de laboratoire. D'ailleurs les Services d'Electronique de Saclay possèdent un camion aménagé de façon à permettre l'utilisation d'un tel matériel.

Ce véhicule du type "Tous terrains" est équipé d'un alternateur de 5 kVA entraîné par le moteur du camion et qui délivre une tension de 220 volts 50 Hz monophasée. Des circuits de régulation assurent une stabilité correcte en fréquence et en tension. D'autre part une batterie d'accumulateurs de grande capacité (24 volts, 180 Ah) permet d'utiliser un convertisseur statique qui délivre 220 volts, 50 Hz, 0,8 kVA.

La cabine "laboratoire" de ce véhicule, est équipée de baies, montées sur amortisseurs, destinées à recevoir les châssis électroniques, et d'une climatisation qui assure au matériel électronique des conditions de fonctionnement proches de celles du laboratoire.

Une flèche orientable est installée à la partie arrière du toit du véhicule. Elle supporte un chariot monté sur rails et actionné par un moteur. Ce dispositif permet de positionner une poulie, solidaire du chariot au-dessus de l'orifice du forage afin de faciliter la descente de la sonde. A l'arrière du camion ont été regroupés, en dehors de la cabine climatisée, un certain nombre d'équipements annexes :

- les bouteilles d'azote liquide et d'azote gazeux,
- les transformateurs 220/127 V et 220/24 V,
- les circuits de charge de la batterie d'accumulateurs
- etc...

Ce véhicule est équipé en outre, d'un cabestan et d'un crochet d'attelage qui permet de tracter la remorque sur laquelle le treuil a été installé.

4 - MESURES DANS LES FORAGES

Trois séries de mesures ont été effectuées dans le bassin Permien de LODEVE (Hérault). La géologie de ce bassin est bien connue et le lecteur en trouvera les traits essentiels dans l'annexe III. Une série de forages réalisés par le C.E.A. est très souvent utilisée pour faciliter la mise au point des nouvelles méthodes. Ils présentent d'ailleurs des caractéristiques intéressantes :

- Diamètre : environ 70 mm



Figure 13 - Vue de la sonde avant sa descente dans le forage.

- Bonne résistance mécanique
- Carottage effectué pratiquement à 100 %
- Anomalies à faibles profondeurs (inférieures à 100 m)
- Bonne accessibilité.

Les carottes issues de ces forages ont fait l'objet, soit d'analyses chimiques, soit de mesures effectuées selon la méthode "THOMMERET". Les caractéristiques des couches radioactives (teneurs, densité, puissance) sont donc connues, ce qui permet de les comparer avec les résultats obtenus à l'aide des méthodes diagraphiques en cours d'élaboration.

Les premières mesures effectuées en juin 1970 avec la sonde équipée d'un détecteur Ge Li (figures 13 et 14), ont eu essentiellement pour objet d'expérimenter le matériel, à l'état de prototype, sur le terrain.

Un certain nombre de spectres ont été obtenus dans les forages n° 104 et 242 à des profondeurs diverses. La sortie des résultats s'est effectuée alors sur enregistreur et imprimante. [21]

Une première interprétation a été faite sur ces données et a fourni la matière nécessaire à la mise au point d'un programme de traitement sur ordinateur.



Figure 14 - Vue du treuil et de la potence, la sonde est en cours de mesures dans le forage.

Deux autres campagnes de mesures ont eu lieu à LODEVE, en octobre 1970 et mai 1971. Les forages n° 119, 122, 129 ont alors été étudiés. La figure 15 montre un spectre étalé sur 3 MeV, obtenu dans le forage n° 104 à une profondeur de 69 m et en regard d'une couche radioactive de puissance 25 cm et de teneur moyenne de l'ordre de 0,28 % en U. Les figures 16, 17 montrent des spectres, limités en énergie, obtenus dans les forages 122 et 119.

4.1 - Méthode et conditions de mesure

La sonde est descendue à faible vitesse le long du forage. On procède alors à une mesure de la radioactivité globale de façon à localiser avec précision, les zones à analyser. Les mesures spectrométriques s'effectuent ensuite, lors de la remontée de la sonde. La couche radioactive est alors parcourue en effectuant des mesures point par point, distantes de 10 cm. Le nombre des spectres ainsi obtenus est évidemment fonction de la puissance de la couche. A LODEVE le nombre de spectres nécessaires au traitement d'une anomalie n'a jamais excédé 20.

Seule la partie du spectre comprise entre 150 et 650 keV étant intéressante pour l'application de la méthode, les seuils du convertisseur (CA 13) ont été réglés en conséquence. Ceci a permis de réduire considérablement le temps mort apporté par le convertisseur, temps mort qui est fonction du nombre d'impulsions et de leurs amplitudes. Il était donc intéressant pour notre application, d'éliminer les énergies situées à l'extérieur de la zone d'intérêt (150 à 650 keV). Il faut souligner que la contribution au comptage global des énergies inférieures à 150 keV est considérable dans le cas de mesures effectuées dans un forage (source épaisse).

Il importe en effet de diminuer le plus possible le temps mort global de la chaîne de mesure, car des essais ont mis en évidence qu'au niveau de la plupart des analyseurs et en particulier au niveau du bloc mémoire utilisé, le circuit de "correction de temps mort" ne fonctionne plus correctement au-delà d'une valeur du temps mort supérieure à 35 %. Une correction supplémentaire a été rendue nécessaire sur les spectres effectués dans des zones de forte activité.

A la suite des premiers essais sur le terrain, les conditions de mesure ont été bien définies et les spectres ont tous été effectués dans les conditions suivantes :

- Etalonnage en énergie : 0,5 keV/canal
- Seuil inférieur : 150 keV
- Seuil supérieur : 650 keV
- Durée de stockage "actif" : 600 s pour un taux de comptage global ≤ 1000 c/s
: 300 s pour un taux de comptage global > 1000 c/s

Chaque spectre a été enregistré sur bande perforée à la suite de ses caractères d'identification et des paramètres de la mesure.

5 - INTERPRETATION DES MESURES SPECTROMETRIQUES [22]

5.1 - Introduction

Le but à atteindre est de calculer la teneur en uranium en fonction de la profondeur, à partir des spectres γ enregistrés dans le forage en des points régulièrement espacés. Les aires des pics d'absorption totale à 185 et 242 keV (ou

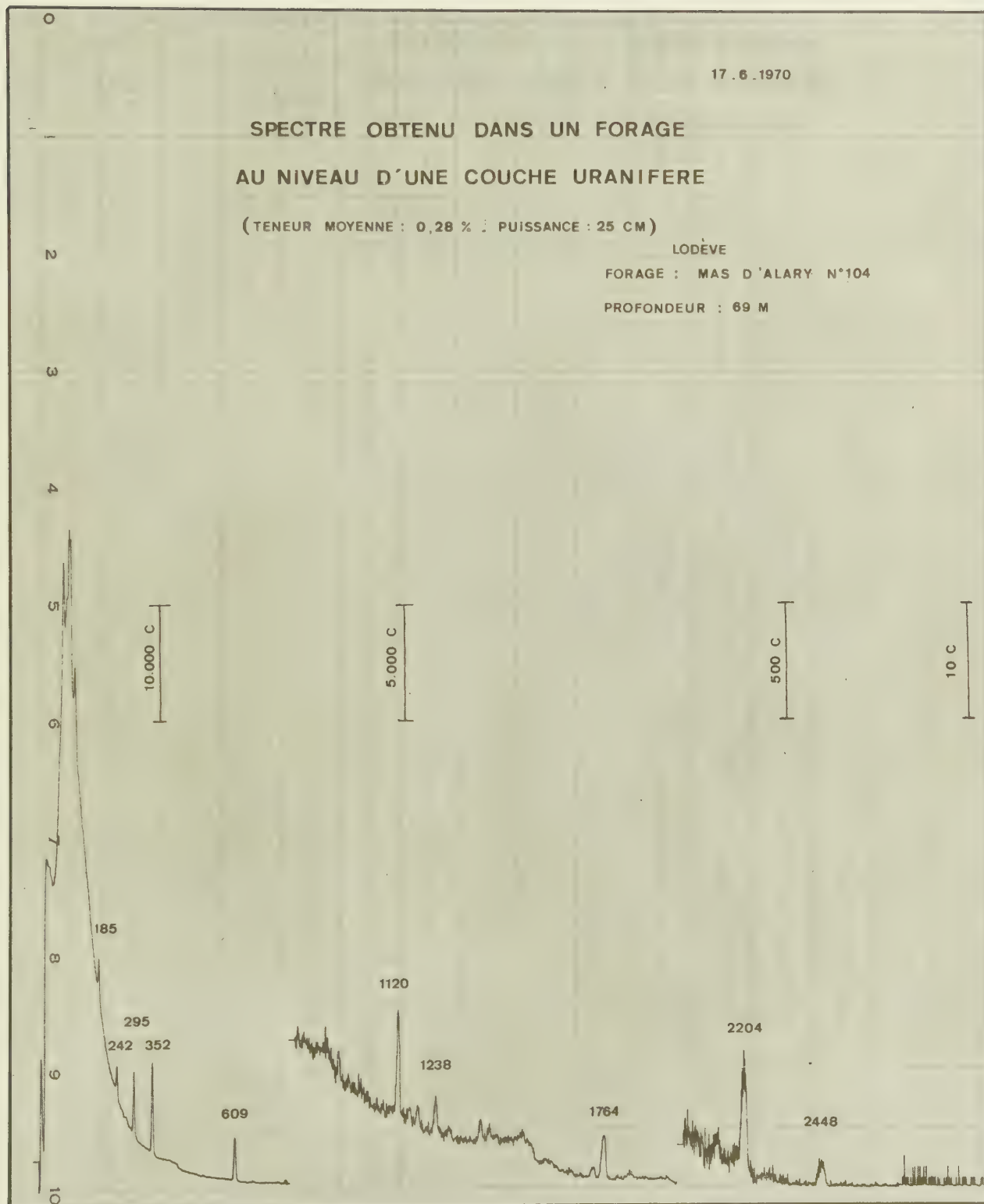


Figure 15

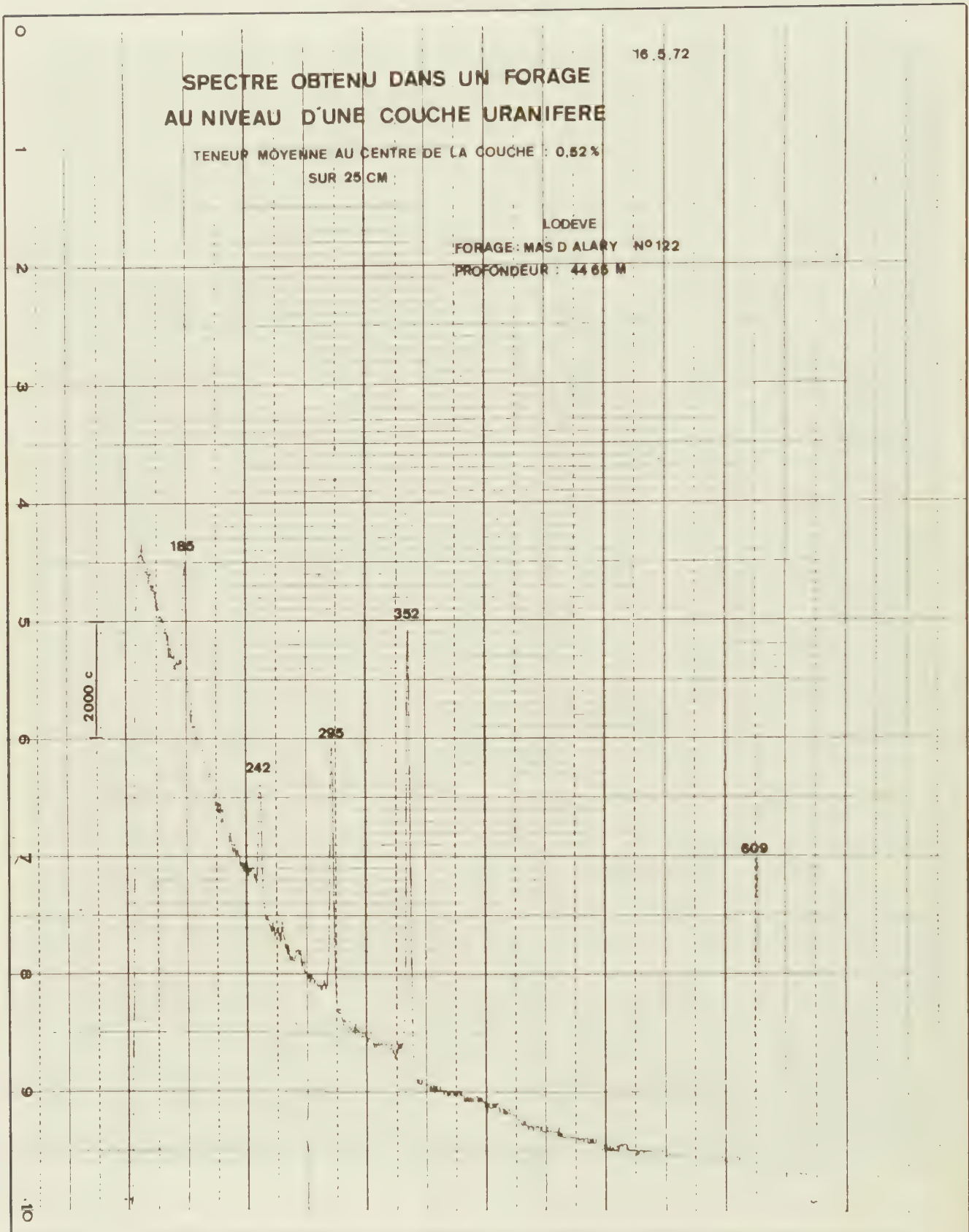


Figure 16

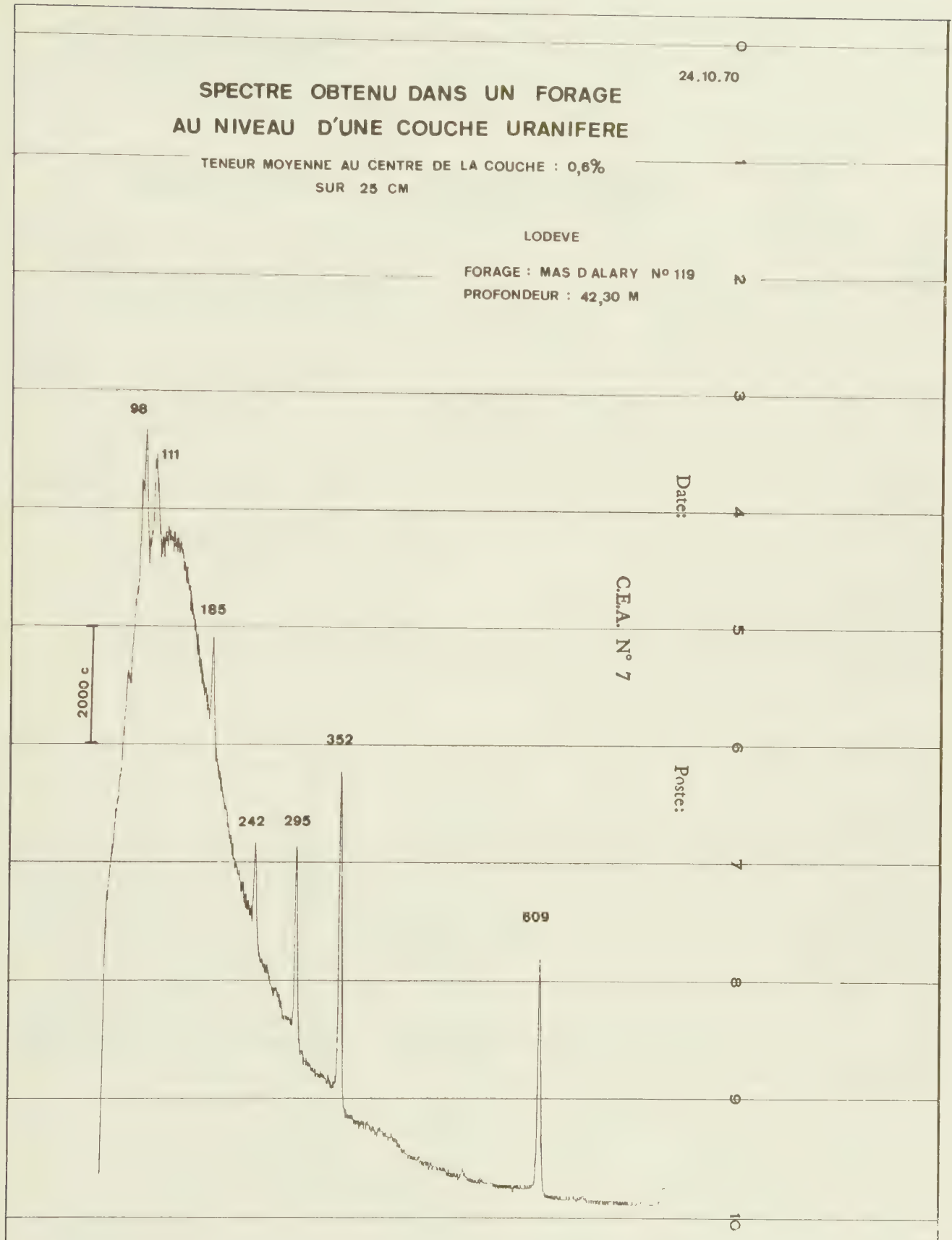


Figure 17

295 keV), utilisées dans cette méthode, sont déterminées par ailleurs [10] et supposées connues. La valeur du coefficient linéaire d'atténuation de la roche pour l'énergie $E_\gamma = 185$ keV est nécessaire au calcul. Il faut donc connaître la lithologie de la matrice ce qui permet de fixer le nombre atomique équivalent Z eq [11] de celle-ci et la densité de la roche. Les autres paramètres du calcul sont :

- le forage,
- les caractéristiques du tubage et de la boue.

L'interprétation se heurte à deux difficultés :

- Le pic à 185 keV provient non seulement de l'uranium 235 mais encore du radium 226 (dans la proportion de 69 % pour un minerai en équilibre). Cet apport peut être corrigé en retranchant de l'aire du pic à 185 keV celle du pic à 242 keV (ou à 295 keV), provenant du ^{214}Pb , affectée d'un certain coefficient. L'équilibre entre le ^{226}Ra et le ^{214}Pb est toujours préservé.
- Le coefficient d'atténuation du rayonnement γ de la roche dépend de la teneur en uranium de celle-ci.

Un étalonnage effectué dans des blocs de béton de teneurs connues en uranium (introduit sous forme de minerai), permet de déterminer d'une part la constante à utiliser pour corriger l'apport du ^{226}Ra , et, d'autre part le facteur de proportionnalité entre la teneur en uranium et l'activité de l'uranium 235 (fraction de l'aire du pic à 185 keV correspondant à ^{235}U).

5.2 - Calcul des teneurs en uranium

Un calcul préliminaire fournit à partir des spectres γ , les aires des pics d'absorption totale, S_{185}^{tot} (^{235}U et ^{226}Ra) et S_{242} (^{214}Pb).

La contribution de l' ^{235}U est :

$$S_{185}^{235} = S_{185}^{\text{tot}} - K S_{242} \quad (1)$$

K étant une constante à déterminer par étalonnage.

Les mesures à traiter comportent N spectres enregistrés dans le forage et séparés par une distance constante h . Il est admis par hypothèse que, lors de chaque enregistrement, le centre du détecteur coïncide avec celui d'une couche de puissance h , de teneur en uranium uniforme, soit q_n pour la couche n (figure 18). Pour alléger les notations l'aire S_{185}^{235} au niveau de la couche n est désignée par S_n .

D'après les travaux de DHANOV [12] et B.F. RHODES, R.A. STALLWOOD et W.E. MOTT [13], il est possible de calculer l'intensité du rayonnement gamma non diffusé, qui, provenant de l'ensemble des points d'une couche élémentaire, atteint un détecteur ponctuel placé en son centre (figure 19) :

$$I(h) = \frac{4\pi k\rho}{\mu_1} \cdot q \cdot \left[\int_0^X e^{-a \sec\theta} \cos\theta d\theta - \int_0^X e^{-b \csc\theta + c \sec\theta} \cos\theta d\theta \right] \quad (2)$$

avec : $X = \text{Artg} \frac{h}{2R}$

$$a = \mu_{Fc}(d_1 + d_2) + \mu_3(R - \frac{D}{2} - d_2)$$

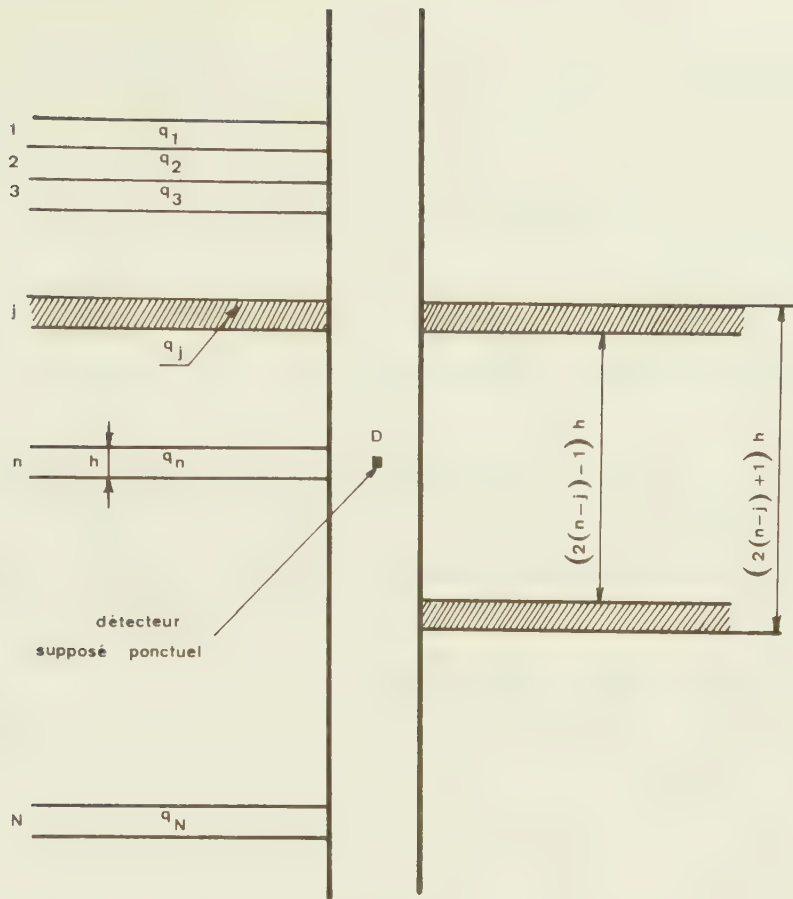


Figure 18

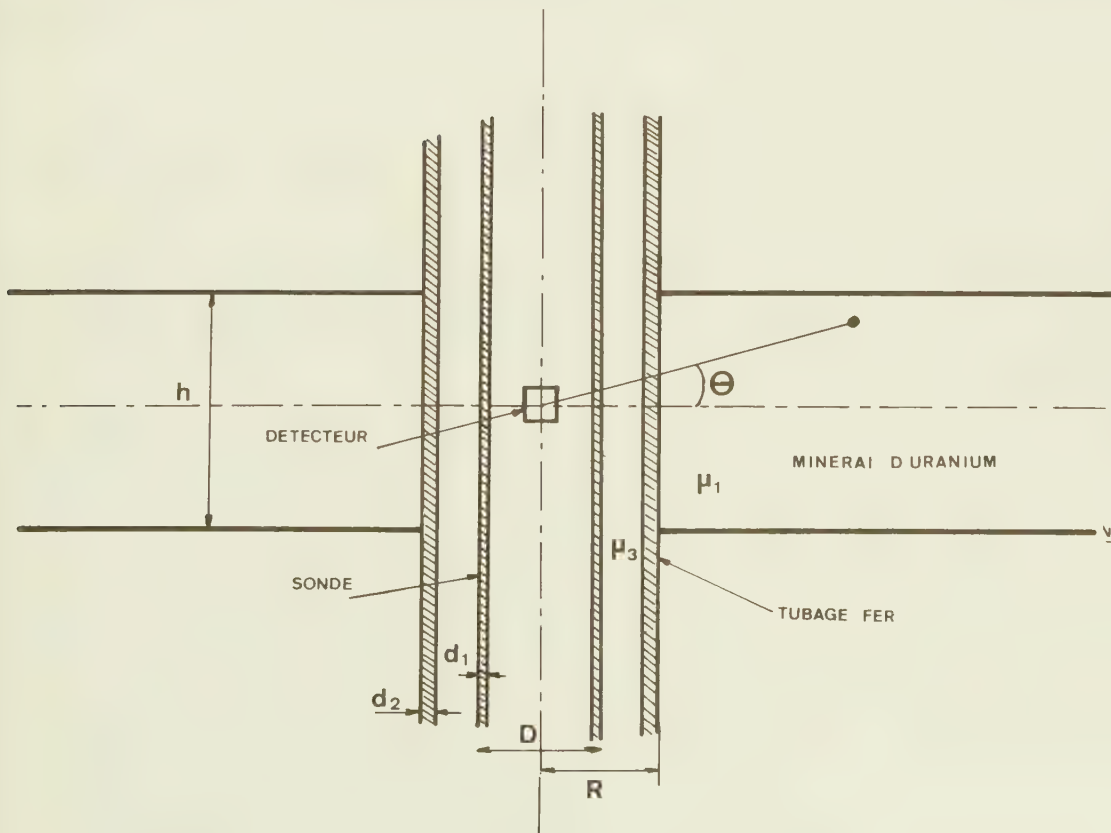


Figure 19

$$b = \frac{\mu_1 h}{2}$$

$$c = \mu_1 R - a$$

et :

k : facteur de proportionnalité à déterminer par étalonnage

ρ : densité de la roche

q : teneur pondérale en uranium

R : rayon du forage

d_1 : épaisseur de la paroi de la sonde (acier inoxydable)

d_2 : épaisseur du tubage (fer)

D : diamètre de la sonde

μ_1 , μ_3 et μ_{Fe} : coefficients d'atténuation du rayonnement γ respectivement pour la roche, la boue du forage et le fer, pour l'énergie $E_\gamma = 185$ keV.

Pour une couche réelle, décomposée en N sous-couches, la formule à utiliser est, d'après J.A. CZUBEK [14] :

$$I_n = q_n \cdot J(h) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=n} q_{n-i} \left\{ J[(2i+1)h] - J[(2i-1)h] \right\} \\ + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=N-n} q_{n+i} \left\{ J[(2i+1)h] - J[(2i-1)h] \right\} \quad (3)$$

avec : $J(h) = I(h)/q$.

Il est clair en effet (figure 18) que l'apport de la couche d'ordre j ($j < n$) vue par le détecteur D placé au centre de la couche de rang n est :

$$\frac{1}{2} q_j \left[J \left\{ [2(n-j) + 1] h \right\} - J \left\{ [2(n-j) - 1] h \right\} \right]$$

Le changement de variable $j = n - i$ conduit aux termes figurant dans la première somme de l'équation (3). Les termes de la seconde somme ($j > n$) sont obtenus de manière analogue.

L'équation (3) permet de calculer N valeurs de I_n , chacune fonction de l'ensemble des teneurs $q_1, q_2, \dots, q_N$. En égalant ces valeurs I_n aux aires S_n correspondantes on obtient un système de N équations linéaires dont les N inconnues sont les teneurs en uranium $q_1, q_2, \dots, q_N$.

En posant :

$$J_1 = J(h) \quad (4)$$

$$J_p = \frac{1}{2} \left\{ J[(2p-1)h] - J[(2p-3)h] \right\} \quad (5)$$

Ce système prend la forme :

$$\left. \begin{aligned}
 J_1 q_1 + J_2 q_2 + J_3 q_3 + \dots + J_N q_N &= S_1 \\
 J_2 q_1 + J_1 q_2 + J_2 q_3 + \dots + J_{N-1} q_N &= S_2 \\
 J_3 q_1 + J_2 q_2 + J_1 q_3 + J_2 q_4 + \dots + J_{N-2} q_N &= S_3 \\
 \dots &\dots \\
 J_n q_1 + J_{n-1} q_2 + \dots + J_1 q_n + \dots + J_{N-n+1} q_N &= S_n \\
 \dots &\dots \\
 J_N q_1 + J_{N-1} q_2 + \dots + J_1 q_N &= S_N
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Ce système a été établi en supposant que les N couches étudiées étaient incluses dans un milieu totalement stérile. En fait, il existe toujours une faible teneur q' en uranium avant l'anomalie radioactive et une faible teneur q'' après celle-ci. Pour introduire l'influence de ces couches encaissantes, on peut supposer que $q' = q_1$ et $q'' = q_N$ [15].

Le détecteur, placé en D_1 (figure 20), enregistre outre la contribution des couches 1, 2, ... N, celle de la couche supérieure de teneur supposée égale à q_1 et de puissance $(N-1)h$. Le coefficient J qui définit cette contribution s'écrit d'après l'équation (5)

$$J_1^* = \frac{1}{2} \{ J [(2N-1)] - J(h) \}$$

D'une manière générale, le détecteur étant placé au niveau de la couche n, il est possible de définir le coefficient correspondant à la contribution de la couche encaissante supérieure, de puissance $(N-n)h$, par :

$$J_n^* = \frac{1}{2} \{ J [(2N-1)h] - J [(2n-1)h] \} \quad (7)$$

Il est clair que pour $n = N$, $J_N^* = 0$.

Les termes correctifs $J_1^*, J_2^*, \dots, J_{N-1}^*$ doivent être ajoutés aux coefficients de même indice de la première colonne de la matrice (6). Pour tenir compte de l'influence de la couche encaissante inférieure, il faut modifier de manière analogue les coefficients de la dernière colonne de cette matrice. Les valeurs numériques des termes correctifs sont les mêmes que ci-dessus, mais disposées en ordre inverse. En résumé pour la $n^{\text{ième}}$ ligne de la matrice, le coefficient de q_1 (première colonne) devient : $(J_n + J_n^*)$ et celui de q_N (dernière colonne) : $(J_{N-n+1} + J_{N-n+1}^*)$, le terme J_{N-n+1}^* étant fourni par la formule (7) pour $n \rightarrow N-n+1$.

Le tableau n° 1 (cf. paragraphe 5.3) montre que le paramètre μ (185) calculé pour les blocs d'étalonnage en fonction de la composition chimique de la matrice (qui est pratiquement constante) et de la teneur en uranium varie sensiblement avec celle-ci. La valeur unique μ_1 utilisée dans les calculs développés ci-dessus est donc légèrement erronée, au moins pour certaines sous-couches, puisque la teneur en uranium varie avec la profondeur. Il est cependant possible d'obtenir une valeur moyenne du coefficient d'atténuation de la roche pour $E\gamma = 185$ keV, avec une précision satisfaisante en procédant de la manière suivante :

D'après la lithologie qui fixe Z eq, on obtient le coefficient d'atténuation

massique (μ/ρ) de la matrice. La densité de la roche étant connue et supposée constante pour une anomalie radioactive donnée, on obtient une valeur μ_1 du coefficient d'atténuation linéaire qui permet de calculer d'après la méthode indiquée au début de ce paragraphe une première série de teneurs approchées : $q_1, q_2, \dots, q_N$. On en déduit une teneur moyenne approchée en uranium :

$$\bar{q}_u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i \quad (8)$$

et une nouvelle valeur moyenne μ_2 permettant de calculer les teneurs en uranium définitives :

$$\mu_2 = (1 - \bar{q}_u) \mu_1 + \bar{q}_u \mu_u \quad (9)$$

μ_u : coefficient d'atténuation linéaire de l'uranium pour $E_\gamma = 185 \text{ keV}$ [16].

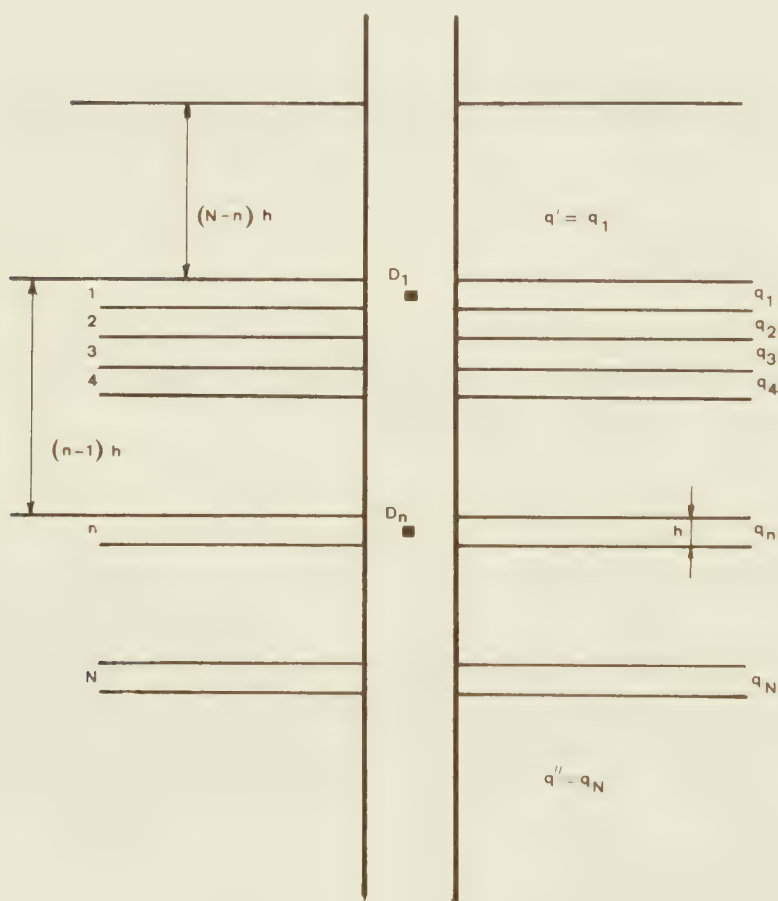


Figure 20

5.3 - Etalonnage

Il a été effectué à l'aide de modèles, en béton renfermant du minerai d'uranium, dont les caractéristiques ¹⁾ sont résumées dans le tableau n° 1.

¹⁾ Les analyses chimiques et les mesures de densité ont été effectuées par le Service de Minéralogie du CEN/FAR (France).

Tableau 1 - Caractéristiques des modèles d'étalonnage

Teneur en U % (Analyse chimique)	Densité apparente	Coefficient d'atté- nuation linéaire $\mu(185)$
6 p.p.m.	1,89	0,249
0,05	1,92	0,255
0,10	1,89	0,252
0,19	1,91	0,258
0,29	1,92	0,262
0,48	1,93	0,270
0,97	1,92	0,284
ζ eq de matrice ≈ 14 Equilibre U/Ra : 1,02 Blocs cubiques de 70 cm d'arête Trou central $\varnothing = 80$ mm Remarques : La composition chimique complète de chaque modèle est également connue. Les sections efficaces utilisées pour le calcul de $\mu(185)$ sont dues à HUBBELL J.H. [17].		

Les spectres gamma sont enregistrés dans chaque modèle (sauf le premier dont la teneur en U est trop faible), le détecteur étant placé en position centrale (figure 21). Il est admis que pour les énergies γ considérées, ces modèles se comportent comme un milieu infini. D'après l'équation (2), la contribution de l'uranium 235 à l'aire du pic à 185 keV est, pour un modèle donné :

$$S_{185}^{235} = \frac{4\pi k \rho q_u}{\mu(185)} F[\mu(185), \mu_{Fe}, p_i] \quad (10)$$

avec :

q_u : teneur en uranium du modèle,

$\mu(185)$: coefficient d'atténuation du rayonnement γ pour $E_\gamma = 185$ keV

$F[\mu(185), \mu_{Fe}, p_i]$: fonction qui peut être complètement explicitée à partir de l'équation (2) :

(p_i : paramètres connus du modèle et de la sonde).

En éliminant S_{185}^{235} entre les équations (1) et (10) il vient :

$$S_{185}^{tot} = K \cdot S_{242} + \frac{k4\pi\rho q_u}{\mu(185)} \cdot F[\mu(185), \mu_{Fe}, p_i] \quad (11)$$

Reportés dans l'équation (11), les résultats de mesure et les paramètres connus de chacun des six modèles, conduisent à un système linéaire redondant dont les inconnues K et k sont calculées par la méthode des moindres carrés.

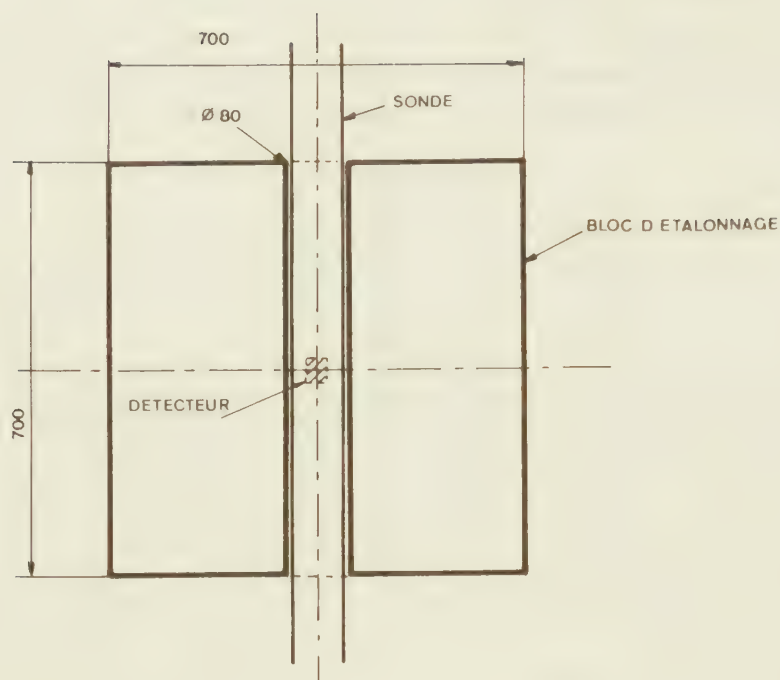


Figure 21

6 - TRAITEMENT AUTOMATIQUE DES DONNEES

6.1 - Programme de calcul des aires des pics

A la suite des mesures dans le forage, on dispose, pour un spectre donné, du contenu de chaque canal de l'analyseur, enregistré sur bande perforée (bande à 5 moments). La première opération consiste alors à lire ces données de façon à les introduire dans la mémoire de l'ordinateur pour procéder ensuite au traitement.

La bande perforée n'étant pas un support directement compatible avec les entrées de l'ordinateur, il est nécessaire de la recopier sur une bande magnétique "intermédiaire", ce qui s'effectue sur l'ordinateur IBM 360-30 à l'aide du programme CEA RUBAN. Cette opération étant exécutée, le programme ANASPE (analyse de spectre) élaboré par HOCLET M. [11] va permettre d'obtenir l'aire des pics.

Seule une partie du programme ANASPE est utilisée. Elle comporte essentiellement les programmes suivants :

- BAMA : lecture de la bande magnétique, traduction et mise en place des données, dans la mémoire centrale de l'ordinateur.
- REPIC : recherche des pics.
- ANPIC : analyse des pics et impression des résultats après chaque spectre.
- SØRDØN : impression des caractéristiques du spectre.
- SØRSPE : impression du contenu des canaux d'un spectre.
- SØRPIC : impression d'un tableau récapitulatif des résultats.
- STØBAN : copie des données lues, traduites et en attente, sur bande magnétique de stockage (cette bande magnétique peut contenir jusqu'à 500 spectres).
- BANSTØ : lecture des données inscrites sur la bande de stockage et introduction dans la mémoire centrale.

Dans le sous-programme ANPIC les pics sont ajustés aux fonctions suivantes :

Pour ANPIC 1 :

$$y_{(x)} = A \exp [-B(x-C)^2] + Dx + E$$

Pour ANPIC 2 :

$$x \leq C \quad y_1(x) = A \exp \left| \frac{-B(x-C)^2}{1 - F(x-C)} \right| + Dx + E$$

$$x \geq C \quad y_2(x) = A \exp [-B(x-C)^2] + Dx + E$$

Dans ces expressions A, B, C, D, E et F sont des paramètres à déterminer.

En annexe I est reproduit un exemple des résultats obtenus à partir d'un spectre. Sur le "LISTING" on trouve :

- L'identification du spectre et les paramètres de mesure (n° du forage, date et heure, durée de stockage, profondeur, etc...).
- Le contenu des canaux.
- Les résultats du traitement de chaque pic détecté :
 - . l'abscisse approximative du pic (en canaux)
 - . la note attribuée au traitement (diagnostic nécessaire en cas d'abandon du calcul)
 - . le nombre de canaux sur lesquels le pic a été ajusté
 - . l'abscisse exacte du pic (en canaux)
 - . la résolution (largeur du pic à mi-hauteur, en canaux)
 - . la surface du pic (en canaux)
 - . le facteur de forme ²⁾ (dans le cas du sous-programme ANPIC 2).

6.2 - Programme de calcul des teneurs

Les aires des pics étant déterminées par le programme ANASPE ces nouvelles données sont introduites dans le programme "TOTO" qui va permettre le calcul des teneurs (voir annexe II).

Outre les aires des pics à 185 et 242 keV (ou à 185 et 295 keV ; dans ce dernier cas seule la valeur du coefficient K est différente), il convient d'introduire dans le programme les valeurs des différents paramètres :

- D1 : épaisseur du corps de sonde
- D2 : épaisseur du tubage
- R : rayon du forage
- AK : facteur de contribution de ²³⁵U à l'aire du pic à 185 keV (déterminé par étalonnage)
- BK : facteur de proportionnalité (déterminé par étalonnage)
- RO : densité apparente de la roche

2)

L'assymétrie du pic est caractérisée expérimentalement par un "facteur de forme"

$$\text{Facteur de forme} = \frac{\text{Largeur totale du pic à mi-hauteur}}{\text{Largeur totale du pic au dixième de sa hauteur}}$$

AMU 185 : coefficient d'atténuation du rayonnement gamma de la boue du forage
à 185 keV

H : distance séparant deux spectres.

En examinant le programme qui est reproduit en annexe II, on retrouve toutes les étapes du calcul détaillé au chapitre 5.2. La sortie des résultats peut s'effectuer de différentes manières ; dans le cas présent, nous obtenons les teneurs sous forme de valeurs numériques et d'une courbe sur laquelle on peut comparer les résultats obtenus par le calcul à ceux fournis par l'analyse des carottes. De plus une diapositive de chacune de ces courbes est obtenue automatiquement.

A titre d'exemple, l'exécution de ce programme a nécessité 9,469 secondes de temps de calcul, sur l'ordinateur CDC 6600, et ceci pour calculer les teneurs de 5 anomalies représentant un total de 81 spectres.

7 - RESULTATS

Au cours des deux campagnes de mesures (octobre 70 et mai 71) cinq anomalies, pour lesquelles les mesures sur carottes avaient été faites, ont été étudiées.

Les figures n° 22 à 26 montrent les résultats obtenus par le calcul, comparés à ceux résultant de l'analyse chimique ou, obtenus à partir de la méthode "THOMMERET".

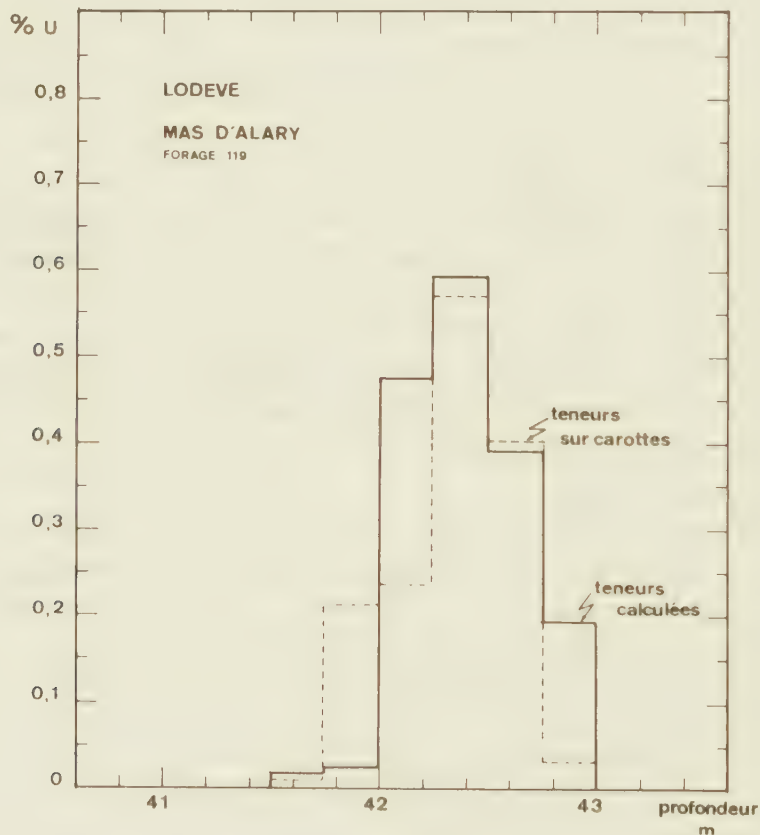


Figure 22 - Comparaison entre les résultats du calcul et l'analyse sur carottes

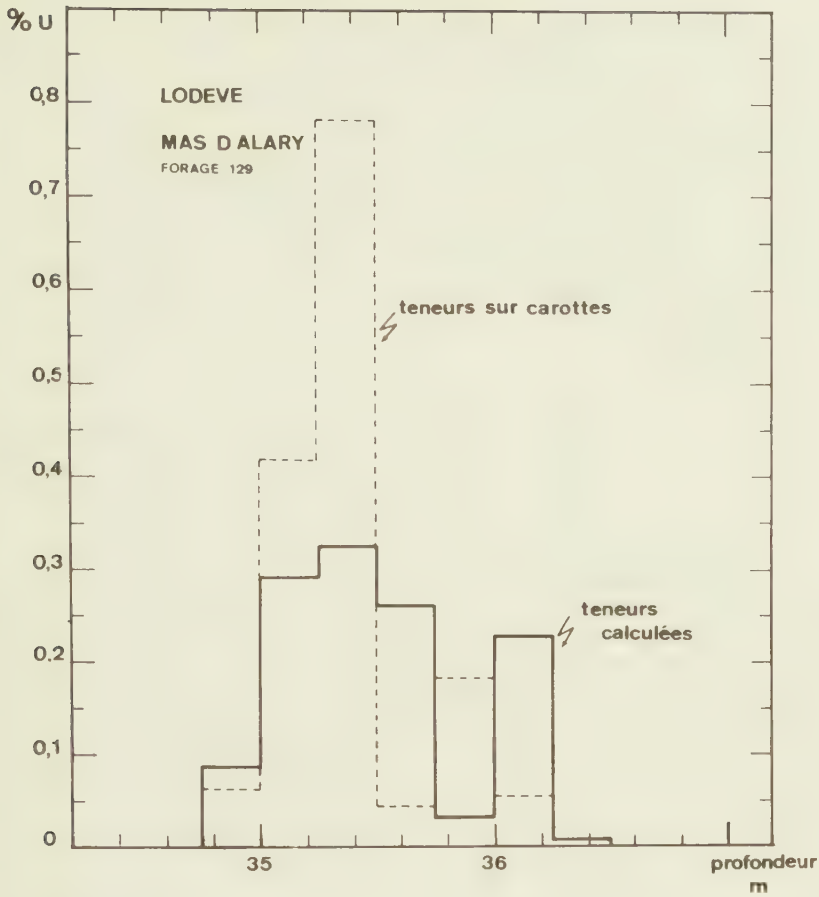


Figure 23
Comparaison entre les
résultats du calcul et
l'analyse sur carottes.

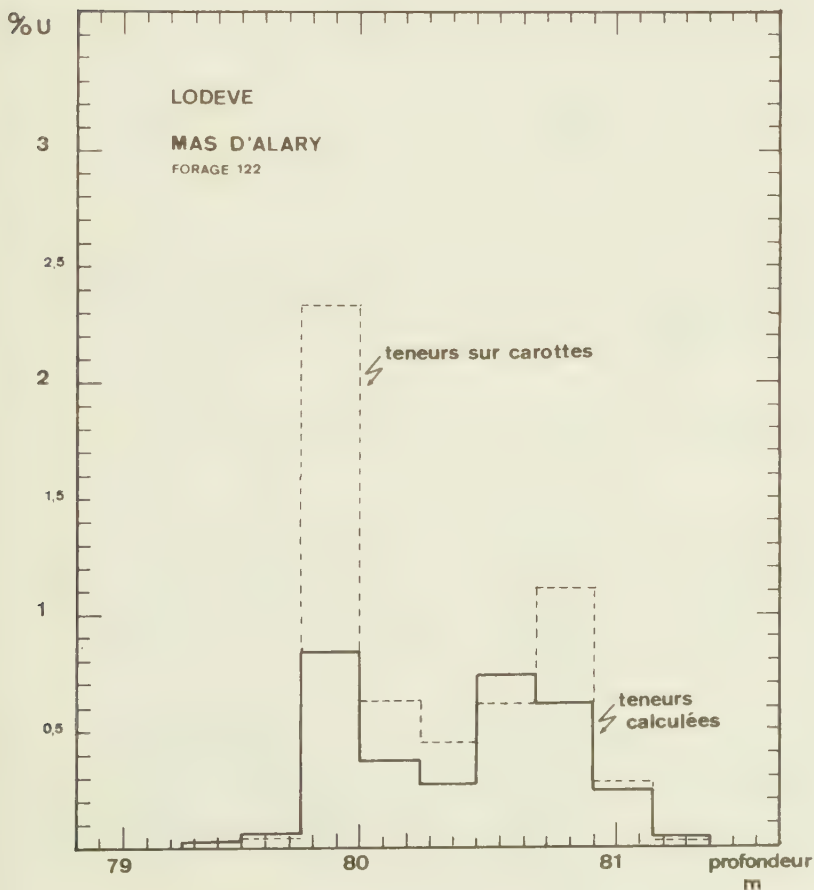


Figure 24
Comparaison entre les
résultats du calcul et
l'analyse sur carottes.

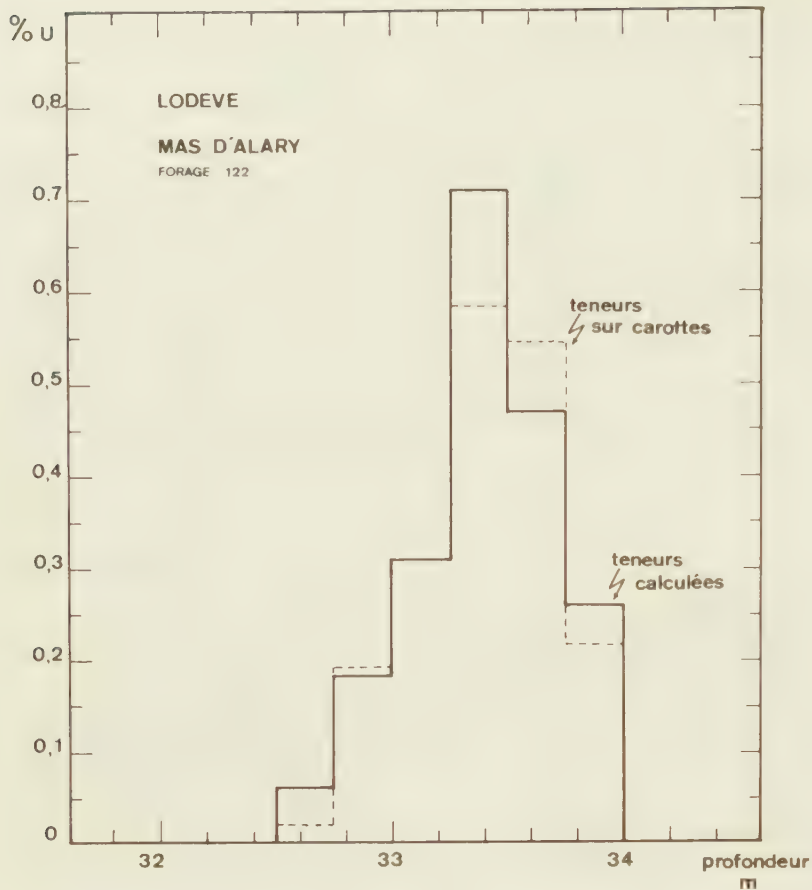


Figure 25
Comparaison entre les
résultats du calcul et
l'analyse sur carottes.

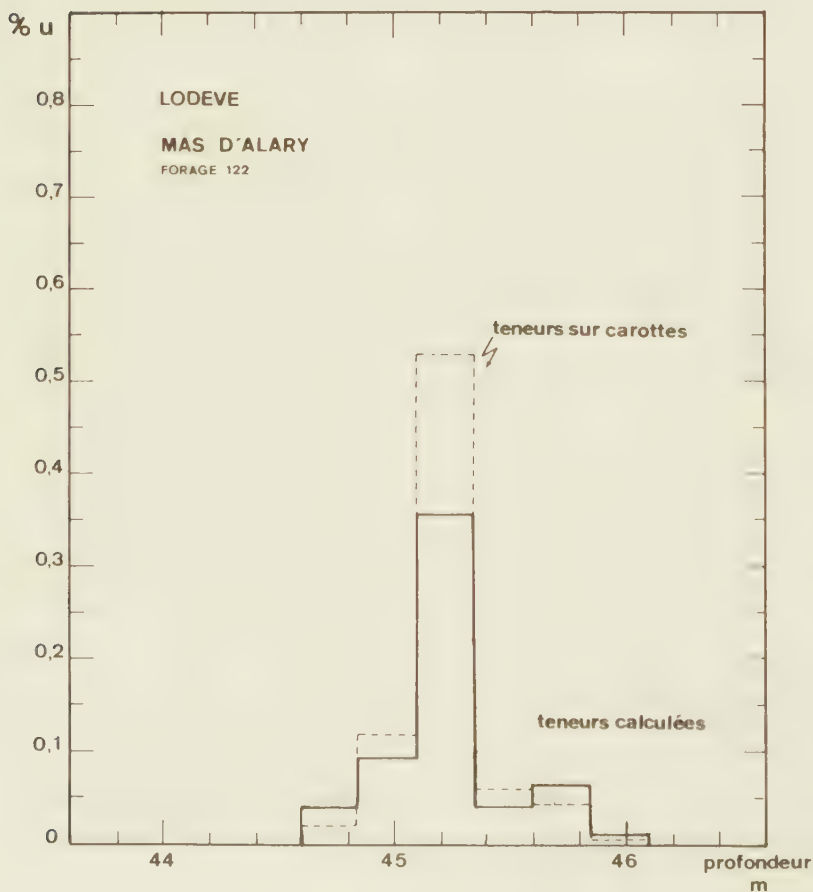


Figure 26
Comparaison entre les
résultats du calcul et
l'analyse sur carottes.

La comparaison entre les deux histogrammes, tracés pour chaque anomalie, ne peut cependant se faire d'une façon rigoureuse. En effet les diagraphies s'effectuent sur un échantillon de la roche différent de celui de la carotte et les erreurs de recoupement pourraient de plus avoir pour origine :

- l'imprécision dans les mesures de profondeur,
- le pendage des couches minéralisées,
- et le fait que les carottes ayant été analysées par tronçons de 25 cm, il a été nécessaire d'effectuer des moyennes sur les teneurs calculées, obtenues par couches de 10 cm.

8 - ADAPTATION DU MATERIEL ET DE LA METHODE A UNE UTILISATION SYSTEMATIQUE

8.1 - Modification de la sonde

D'ores et déjà, une nouvelle sonde est réalisée. Elle bénéficie d'améliorations sensibles par rapport au prototype, en particulier en ce qui concerne le mode de refroidissement. Pour le fonctionnement dans les forages, l'azote liquide est remplacé, juste avant l'introduction de la sonde dans le trou, par une cartouche remplie de propane préalablement gelé par immersion dans l'azote liquide. On utilise alors le palier de changement d'état "solide-liquide" du propane à $-187,69^{\circ}\text{C}$. On bénéficie, en outre, de la chaleur spécifique du propane solide, entre la température de l'azote liquide à laquelle il a été gelé, et la température de fusion.

Ce système présente plusieurs avantages. Tout d'abord il n'est plus nécessaire d'évacuer l'azote gazeux résultant de l'évaporation de l'azote liquide, ce qui simplifie considérablement le câble (suppression du "TOMBAC") et par voie de conséquence le treuil (équipé d'un câble de 500 m). Il devient en outre possible de disposer la charge de froid dans la partie inférieure de la sonde, libérant ainsi la partie supérieure pour la mise en place des circuits électroniques. Cette disposition conduit à des simplifications mécaniques considérables, en évitant par exemple, la traversée d'enceintes sous vide par les câbles électriques. De plus, la sonde peut être utilisée horizontalement.

Des essais, actuellement en cours, vont permettre de mesurer les caractéristiques de cette sonde avec sa cartouche de propane, en particulier, son autonomie ainsi que les différents paliers de refroidissement et de réchauffement du détecteur. En première approximation il semble que l'on puisse espérer une autonomie voisine de 8 heures.

Bien entendu, en dehors du fonctionnement dans les forages la cartouche de propane est remplacée par l'azote liquide, la sonde ayant été préalablement retournée.

La figure 27 montre le schéma de principe de cette nouvelle sonde, et la figure 28 le détail de la chambre du détecteur. On peut remarquer, qu'un souci de simplification a conduit à l'adoption d'un vide unique, commun à la réserve d'azote ou de propane et à la chambre du détecteur.

8.2 - Modifications de la chaîne de mesure

Pour éviter le transport d'impulsions "analogiques" sur de grandes distances, ce qui pour une chaîne de spectrométrie fine présente des inconvénients bien connus,

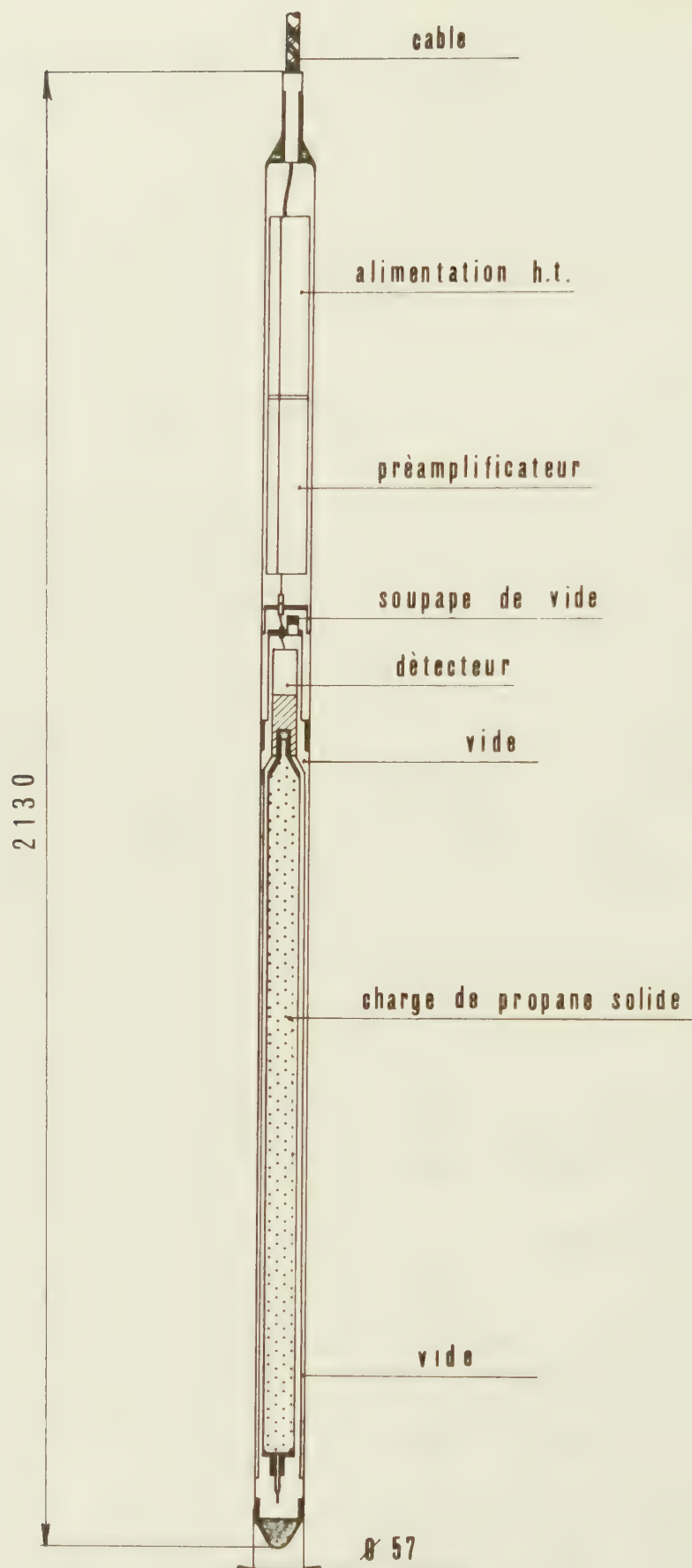


Figure 27

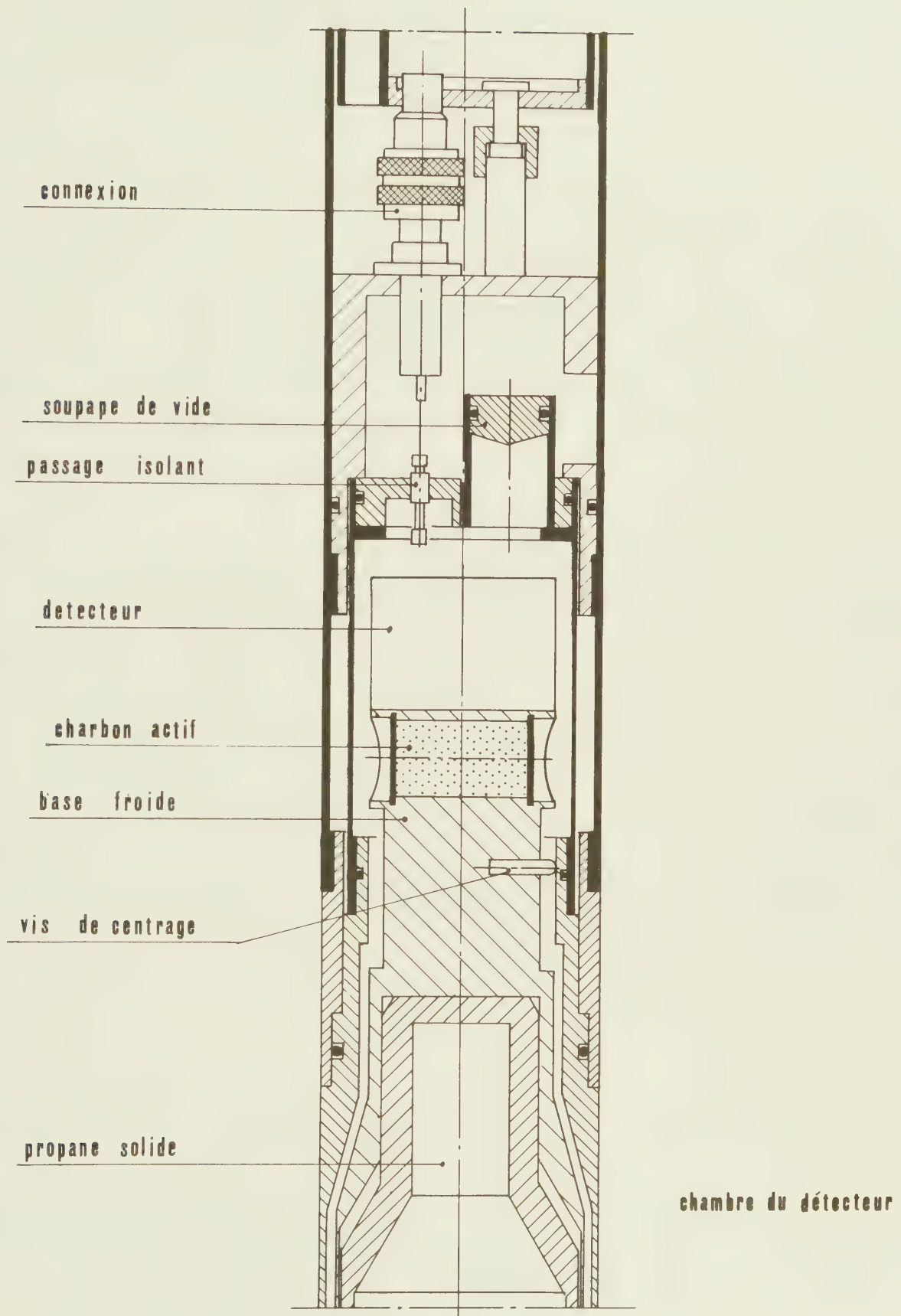


Figure 28

une étude actuellement en cours, a pour but d'incorporer à la sonde, à la suite du préamplificateur, un convertisseur "analogique-digital". Ce circuit, limité dans une première phase de l'étude à 256 canaux permettrait d'acheminer vers la surface des impulsions "logiques" beaucoup plus aisées à transporter. Il serait alors associé à une unité "mémoire" et à un petit ordinateur permettant de déterminer l'aire des pics de chaque spectre et de sortir ces résultats sur imprimante et perforatrice. Les surfaces des pics, acquises simultanément avec les mesures, pourraient être ensuite introduites dans le calculateur où serait effectué le calcul des teneurs à l'aide d'un autre programme.

Un circuit d'aiguillage peut encore permettre de stocker les informations sur une partie de "l'unité mémoire" pendant que l'ordinateur calcule les surfaces des pics sur le spectre stocké précédemment dans une autre partie de "l'unité mémoire". Ce système permet d'effectuer des diagraphies avec la sonde en mouvement dans le forage, la vitesse de celle-ci déterminant le pas de mesure.

Il est dès maintenant envisagé, pour l'application de cette méthode, d'utiliser un PLURIMAT 20, ensemble constitué d'un calculateur MULTI 8 et d'une unité de visualisation.

9 - AUTRES APPLICATIONS POSSIBLES DE LA SONDE Ge Li

En dehors de la méthode de détermination de la teneur en uranium des roches, il apparaît qu'à partir de ce nouveau type d'appareillage, on puisse envisager d'autres méthodes.

Dans le domaine du gamma naturel, la mesure des teneurs en U, Ra, Th et K peut s'effectuer directement avec la chaîne de mesure et la méthode actuelle, puisque dans le programme de traitement, les aires des pics sont calculées en premier lieu. La connaissance des concentrations en Ra, Th et K permet de contribuer à l'étude de la nature lithologique des formations ainsi qu'à celle du milieu de sédimentation des roches.

Parmi les méthodes basées sur la radioactivité artificielle on peut distinguer :

- l'analyse par activation neutronique (thermique ou rapide) qui apparaît comme un domaine riche en possibilités (J.A. CZUBEK [17]).

- Les méthodes basées sur la détection des photons de capture radiative et des photons de diffusion inélastique.

- La spectrométrie "MOSSBAUER" basée sur un phénomène d'absorption résonnante au niveau nucléaire.

- La fluorescence X sur les éléments de numéro atomique élevé (la détection des X de faible énergie restant toujours délicate dans les forages à cause de l'absorption du milieu).

Dans les différentes méthodes qui viennent d'être énumérées, la sonde Ge Li peut jouer un rôle décisif. On peut, de plus, noter que des sources isotopiques de neutrons de forte activité spécifique ($2,3 \cdot 10^{12}$ n.g⁻¹s⁻¹ pour le californium 252) sont maintenant disponibles sur le marché.

L'association de telles sources, à un détecteur de bonne résolution en éner-

gie (Ge Li) permet de reconsidérer, dans le domaine de l'analyse par activation, certaines méthodes peu utilisées jusqu'à présent à cause des performances médiocres des compteurs à scintillation et de la complexité de mise en oeuvre des générateurs de neutrons.

10 - CONCLUSION

Les résultats de cette étude peuvent être résumés comme suit :

Une nouvelle méthode de mesure des teneurs en uranium des roches dans les forages a été mise au point, et les résultats obtenus peuvent être considérés comme satisfaisants. Contrairement aux méthodes diagraphiques utilisées jusqu'à maintenant, la mesure des teneurs s'effectue indépendamment de l'état d'équilibre U/Ra.

Un effort technologique important a été nécessaire pour réaliser la sonde actuelle et a permis d'effectuer en juin 1970 la première mesure dans les forages avec un détecteur Ge Li.

Si dans l'état actuel des choses, ce type de sonde peut paraître d'une mise en oeuvre délicate, et ce, essentiellement à cause des servitudes imposées par le détecteur, il faut néanmoins noter que les semicteurs sont actuellement en pleine évolution. D'ores et déjà de nouveaux types de détecteurs, dont certains sont utilisables à la température ordinaire, possédant des caractéristiques voisines de celles des Ge Li, ont été expérimentés en laboratoire.

R. STUCK, J.P. PONPON et P. SIFFERT [18] font état de résultats obtenus avec un détecteur au germanium de haute pureté (1,2 keV sur le pic à 662 keV du ^{137}Cs à 5°K).

K.ZANIO [19] a obtenu avec un détecteur au tellure de cadmium une résolution de 6 keV sur le pic à 122 keV du ^{57}Co et ce à 0°C.

J.E. EBERHART, R.D. RYAN et A.J. TAVENDALE [20] ont obtenu avec un détecteur à l'arséniure de gallium, 2,5 keV sur un pic γ à 140 keV et à 300°K.

Il est donc permis de penser que dans un avenir proche, il sera possible d'utiliser ces détecteurs pour la spectrométrie γ dans les forages, en évitant les servitudes qui sont imposées actuellement. C'est pourquoi il est nécessaire de continuer dès maintenant à utiliser la sonde Ge Li, en particulier dans le domaine de l'analyse par activation.

ANNEXE I

TRAITEMENT D'UN SPECTRE PAR LE PROGRAMME ANASPE

EXEMPLE DE RESULTATS

NUMERO DE LA MESURE 223

DEBUT DU STOCKAGE A 10 H 30 MM 0 5 LE 18 MAI

TEMPS DE STOCKAGE ACTIF 300 S

LIMITES DU SPECTRE EN MEMOIRE 300 1299

LIMITES DE LA PARTIE DE SPECTRE A ANALYSER 300 1299

SURFACE DU SPECTRE 4152220

PROFONDEUR = 3505

***** NUMERO DU CANAL CORRESPONDANT A LA PREMIERE COLONNE DU TABLEAU

**
*

CONTENU DES CANAUX

300	*	2471	2607	2705	2772	3095	3424	3866	4592	5430	6774	8288	9486	11026	12233	12834	13568	13168	13429	13387	13507
320	*	13531	13491	13390	13430	13391	13268	13409	13424	13283	13300	13220	13341	13007	13067	13160	13053	12938	12798	12916	12638
340	*	12608	12583	12700	12709	12619	12643	12635	12452	12478	12476	12228	12392	12118	12158	12104	12268	12262	12181	12035	12221
360	*	12019	11805	12158	11803	11921	11806	11931	11814	11775	11060	11879	11808	12007	12100	12483	12926	13363	13267	13361	12938
380	*	12356	11816	11440	11204	11030	10887	10699	10790	10822	10705	10823	10755	10486	10504	10578	10514	10575	10495	10309	10234
400	*	10044	10196	10305	10290	9823	10088	9934	9949	10026	9848	9768	9658	9760	9679	9507	9503	9590	9601	9407	9316
420	*	9278	9073	9104	9108	9108	9025	9002	8823	8936	8877	8823	8856	8805	8607	8737	8769	8651	8730	8501	8650
440	*	8578	8486	8388	8514	8473	8431	8579	8370	8229	8201	8415	8280	8056	8018	8199	8188	7907	7923	8027	8024
460	*	8038	7905	7836	7862	7934	7904	7682	7854	7704	7707	7544	7768	7631	7504	7684	7743	7736	7619	7701	7594
480	*	7438	7365	7500	7598	7955	8046	8443	8773	9161	9061	8920	8389	7702	7346	7021	7099	6775	6806	6688	6660
500	*	6415	6047	6529	6528	6447	6458	6527	6378	6507	6414	6457	6274	6415	6428	6208	6508	6302	6295	6232	6384
520	*	6103	6302	6359	6093	6174	6189	6105	6064	6167	5825	5954	5957	5884	5839	5869	5826	5810	5821	5769	5772
540	*	5820	5828	6001	5932	5932	5868	5839	5909	5673	5757	5683	5572	5744	5659	5587	5668	5543	5556	5543	5346
560	*	5434	5411	5306	5330	5367	5370	5321	5244	5363	5307	5235	5251	5282	5186	5351	5327	5193	5175	5117	5147
580	*	5121	4998	5207	5189	5295	5347	5312	5440	5591	6019	6461	7414	8503	9389	9905	9360	8808	7426	6421	5419
600	*	5018	4735	4713	4629	4633	4498	4561	4505	4480	4455	4461	4305	4474	4499	4493	4422	4328	4199	4362	4318
620	*	4327	4256	4248	4290	4200	4328	4221	4212	4224	4226	4172	4108	4160	4299	4051	4072	4098	4068	4116	4033
640	*	4159	4167	4025	4186	4071	4176	4101	3989	3929	4004	4157	3985	3993	3988	3949	3856	3717	3975	3977	3987
660	*	4001	3981	3845	4009	3982	3919	3919	3942	3768	3785	3780	3903	3885	3904	3877	3813	3863	3825	3807	3757
680	*	3848	3813	3813	3859	3703	3740	3820	3780	3836	3846	3847	3973	3925	4022	4000	3825	4045	4034	4154	4356
700	*	4447	5597	5819	6846	8410	10238	11659	11844	10840	9332	7436	5541	4550	3820	3384	3283	3204	3114	3145	3080
720	*	3639	3655	3610	3606	2973	2944	3105	3004	3043	3135	2921	2946	2893	2928	2947	3034	2997	2948	2917	2924
740	*	2862	2860	2944	2947	2903	2814	2890	2918	2856	2942	2755	2889	2827	2943	2864	2693	2873	2788	2855	2724
760	*	2839	2750	2814	2774	2780	2755	2812	2802	2743	2807	2689	2781	2844	2750	2856	2833	2861	2731	2743	2799
780	*	2844	2789	2747	2843	2751	2702	2667	2735	2676	2611	2664	2692	2656	2627	2585	2597	2629	2666	2574	2628
800	*	2535	2610	2630	2582	2685	2635	2677	2722	2591	2659	2663	2591	2570	2629	2561	2572	2613	2619	2470	2460
820	*	2534	2595	2537	2423	2547	2497	2473	2490	2422	2549	2517	2445	2440	2418	2468	2462	2361	2361	2468	2463
840	*	2526	2472	2452	2349	2372	2376	2350	2366	2361	2340	2233	2308	2311	2336	2345	2261	2193	2229	2333	2281
860	*	2197	2208	2144	2176	2167	2221	2088	2141	2024	2045	2106	2052	2048	2004	2076	2064	1951	2031	2043	1985
880	*	2002	1970	2030	1997	1974	1958	1916	1922	2043	1922	2020	1935	1973	1945	1949	1865	1884	1918	1918	1820
900	*	1840	1865	1809	1859	1953	1873	1908	1758	1869	1913	1976	1859	1870	1884	1870	1807	1943	1783	1814	1756
920	*	1753	1830	1890	1793	1733	1789	1667	1678	1716	1685	1719	1732	1726	1637	1634	1770	1691	1690	1664	1712
940	*	1684	1651	1708	1709	1655	1669	1614	1626	1660	1669	1557	1657	1708	1599	1655	1680	1620	1600	1571	1620
960	*	1591	1581	1402	1467	1559	1495	1528	1468	1548	1540	1547	1523	1589	1503	1424	1484	1550	1481	1444	1401
980	*	1495	1497	1425	1476	1467	1423	1428	1464	1554	1472	1445	1497	1413	1461	1406	1516	1412	1473	1564	1571
1000	*	1608	1597	1585	1629	1506	1490	1554	1431	1478	1444	1431	1452	1406	1347	1404	1323	1326	1397	1395	1339
1020	*	1341	1346	1382	1383	1429	1381	1285	1348	1386	1347	1398	1388	1343	1349	1334	1301	1348	1375	1360	1341
1040	*	1281	1289	1202	1297	1354	1378	1293	1339	1351	1338	1405	1330	1338	1387	1332	1270	1328	1304	1328	1267
1060	*	1261	1343	1301	1293	1345	1258	1319	1309	1241	1343	1276	1294	1264	1302	1267	1272	1284	1278	1253	1287
1080	*	1269	1241	1302	1227	1291	1198	1285	1235	1291	1272	1251	1228	1219	1209	1208	1239	1207	1225	1247	1205
1100	*	1247	1245	1192	1287	1292	1214	1226	1244	1239	1242	1324	1208	1304	1289	1258	1276	1256	1238	1263	1261
1120	*	1235	1231	1233	1230	1234	1168	1253	1238	1278	1218	1227	1216	1223	1178	1223	1238	1257	1265	1308	1250
1140	*	1294	1251	1259	1223	1222	1234	1177	1239	1209	1176	1219	1134	1225	1202	1196	1297	1237	1265	1221	1215
1160	*	1199	1250	1171	1208	1202	1221	1260	1247	1242	1280	1245	1258	1348	1251	1220	1284	1322	1314	1309	1264
1180	*	1361	1309	1314	1367	1420	1427	1476	1488	1608	1668	1846	2214	2540	3252	4165	5366	6348	7097	7250	6558
1200	*	5400	4272	3038	2236	1599	1251	1133	1054	1054	1078	978	1066	1012	983	972	951	920	979	949	963
1240	*	897	963	924	920	917	927	935	917	911	911	928	905	949	910	946	939	939	925	923	921
1260	*	987	920	918	893	899	828	906	901	899	859	903	895	894	874	924	897	850	875	865	850
1280	*	878	843	828	803	830	903	885	848	822	894	858	853	874	900	872	833	882	815	838	829

		RESIDU	ABSCISSE	RESOLUTION	SURFACE	FACTEUR DE FORME
MBLasi = 3						
310	4.	10.				
377	3.	18.	6.940	377.697 +00-	0.008	6.331 +00- 0.199
489	3.	19.	20.021	489.042 +00-	0.009	6.189 +00- 0.252
594	2.	23.	33.312	594.595		6.129
594	3.	23.	20.472	594.725 +00-	0.051	6.079 +00- 0.094
707	2.	23.	71.234	707.221		6.336
707	2.	23.	27.320	707.368		6.281
1022	1.	28.	28.640	1022.453		8.969
1218	2.	24.	85.654	1218.037		7.014
1218	3.	24.	22.324	1218.236 +00-	0.035	6.937 +00- 0.060
						14227. +00- 563.
						13364. +00- 650.
						31818.
						32517. +00- 598.
						54842.
						56232.
						1.893
						1764.
						44023.
						45257. +00- 474.
						1.903 +00- 0.013

ANNEXE II

PROGRAMME DE CALCUL DES TENEURS A PARTIR DES AIRES DES PICS


```
//ANDRIEUX JOB 5*SEI**7602*SEI***0201T000.3*0001*002*060*66E*50*
BBL(BBLTRAC)
RUN(S)
PRESETI.
LGO.
I
```

```
PROGRAM TOTO(INPUT,OUTPUT,TAPE5=INPUT,TAPE6=OUTPUT)
DIMENSION SN(24),SN1(24),B1(47),S1(47),S2(47),AJSTA(24),
IAI(24),Q(24),A(24,25),KAUX(24),AJ(24),S235(24)
DIMENSION Q25(10),Q12(48)
DIMENSION X(100),Y(100),Z(100),CHIM(10),TG(50),TX(3)
EXTERNAL F1,F2,AQLB27
COMMON E,B,C
6 READ(5,10)D1,D2,R,AK,BK,RO,AMU185,AMU3,H
10 FORMAT(2F7.3,F6.1,2F9.5,3F6.3,F6.1)
IF(RO.LT.0.1)GO TO 2002
C -----
C INITIALISATIONS
C -----
DO 2010 I=1,100
X(I)=0.0
Y(I)=0.0
Z(I)=0.0
2010 CONTINUE
DO 2011 I=1,10
CHIM(I)=0.0
Q25(I)=0.0
2011 CONTINUE
DO 2012 I=1,24
SN(I)=0.0
SN1(I)=0.0
2012 CONTINUE
C -----
C LECTURE ET IMPRESSION DES DONNEES
C -----
WRITE(6,101)
101 FORMAT(24H0 VALEURS DES PARAMETRES,///)
WRITE(6,11)D1,D2,R,AK,BK,RO,AMU185,AMU3,H
11 FORMAT('0D1=',F5.3,' D2=',F5.3,' R=',F4.1,' AK=',F7.3,' BK=',F
*9.5,' RO=',F5.3,' AMU185=',F5.3,' AMU3=',F5.3,' H=',F6.1)
DO 12 K=1,3
I1=1+(K-1)*8
I8=8+(K-1)*8
READ(5,13)(SN(II),II=I1,I8)
12 CONTINUE
13 FORMAT(8F9.0)
N=1
DO 126 I=2,24
IF(SN(I).GT.0.5)N=N+1
126 CONTINUE
DO 90 I=1,N
SN1(I)=SN(N-I+1)
DO 91 I=1,N
SN(I)=SN1(I)
91 SN1(I)=0.
```

```

      WRITE(6,127)N
127  FORMAT('NOMBRE DE SPECTRES N=',I3)
      WRITE(6,14)
14   FORMAT('O VALEURS DE SN (185KEV)',///)
      WRITE(6,15)(SN(I),I=1,N)
15   FORMAT(1H ,8F12.2)
      DO 112 K=1,3
      I1=1+(K-1)*8
      I8=8+(K-1)*8
      READ(5,113)(SN1(I1),I1=1,I8)
112  CONTINUE
      DO 3032 I=1,N
3032  AJ(I)=SN1(N-I+1)
      DO 3033 I=1,N
      SN1(I)=AJ(I)
3033  AJ(I)=0.
      READ(5,4)IN,IP,(CHIM(I),I=1,10)
4    FORMAT(I3,I3,10F6.3)
113  FORMAT(8F9.0)
      WRITE(6,114)
114  FORMAT('O VALEURS DE SN1 (295KEV)',///)
      WRITE(6,115)(SN1(I),I=1,N)
115  FORMAT(1H ,8F12.2)
C -----
C  CALCUL DES COEFFICIENTS
C -----
      IFFIC=N-1
      E=1.406*(D1+D2)+AMU3*(R-2.85-D2)
      IPAS=2*N-1
      C=AMU185*K-E
      DO 16 I=1,IPAS,2
      A11=0.
      B1(I)=ATAN(I*H/2./R)
      P1=1.E-6
      E1=0.
      PAS1=0.1
C -----
C  1 ERE INTEGRALE
C -----
      CALL AQDGL1(F1,A11,B1(I),P1,E1,PAS1,AQLB27,S1(I))
16   CONTINUE
      DO 17 I=1,IPAS,2
      B=AMU185*I*H/2.
      A2=0.
      P2=1.E-6
      E2=0.
      PAS2=0.1
C -----
C  2 EME INTEGRALE
C -----
      CALL AQDGL1(F2,A2,B1(I),P2,E2,PAS2,AQLB27,S2(I))
17   CONTINUE
C -----
C  CALCUL DE L INTENSITE GAMMA NON DIFFUSEE
C -----
```

```

DO 100 I=1,IPAS,2
  AI(I)=12.56637*AK*RO/AMU185*(S1(I)-S2(I))
100  CONTINUE
C -----
C DECONVOLUTION
C -----
  AJ(1)=AI(1)
  DO 24 I=2,N
    AJ(I)=0.5*(AI(2*I-1)-AI(2*I-3))
24  CONTINUE
    DO 902 I=1,IFFIC
      AJSTA(I)=0.5*(AI(IPAS)-AI(2*I-1))
902  CONTINUE
      DO 600 I=1,N
        IF(AJ(I).LT.1.E-50)AJ(I)=0.
600  CONTINUE
        WRITE(6,42)
42   FORMAT(15H0 VALEURS DE B1,///)
        WRITE(6,200)(B1(I),I=1,IPAS,2)
200  FORMAT(1H,8E16.9)
        WRITE(6,18)
18   FORMAT(15H0 VALEURS DE S1,///)
        WRITE(6,203)(S1(I),I=1,IPAS,2)
203  FORMAT(1H,8E16.9)
        WRITE(6,20)
20   FORMAT(15H0 VALEURS DE S2,///)
        WRITE(6,204)(S2(I),I=1,IPAS,2)
204  FORMAT(1H,8E16.9)
        WRITE(6,22)
22   FORMAT(15H0 VALEURS DE AI,///)
        WRITE(6,205)(AI(I),I=1,IPAS,2)
205  FORMAT(1H,8E16.9)
        WRITE(6,25)
25   FORMAT(15H0 VALEURS DE AJ,///)
        WRITE(6,26)(AJ(I),I=1,N)
26   FORMAT(1H,8E16.9)
        WRITE(6,506)
506  FORMAT(7H0 AJSTA,///)
        WRITE(6,507)(AJSTA(I),I=1,IFFIC)
507  FORMAT(1H,8E16.9)
        DO 1 J=1,N
          DO 1 I=J,N
            A(I,J)=AJ(I-J+1)
            A(J,I)=A(I,J)
          CONTINUE
          DO 900 I=1,IFFIC
            A(I,1)=A(I,1)+AJSTA(I)
900  CONTINUE
          DO 901 I=2,N
            A(I,N)=A(I,N)+0.5*(AI(IPAS)-AI(2*N+1-2*I))
901  CONTINUE
          DO 2 I=1,N
            A(I,N+1)=SN(I)-BK*SN1(I)
            S235(I)=A(I,N+1)
            IF(A(I,N+1).LT.1.E-50)A(I,N+1)=0.

```

```
2      CONTINUE
      WRITE(6,102)
102     FORMAT('0CONTRIBUTION DE 235U')
      WRITE(6,103) (S235(I),I=1,N)
103     FORMAT(8F16.2)
      IA=24
      M=1
C -----
C  CALCUL DES TENEURS
C -----
      CALL ALSB(A,IA,N,M,KAUX,IER)
      WRITE(6,50)
50      FORMAT(16H0 TENEURS BRUTES,///)
      WRITE(6,501) (A(I,N+1),I=1,N)
501     FORMAT(1H ,8E16.9)
      DO 301 I=1,N
      Q(I)=A(I,N+1)
301     CONTINUE
      SQA=Q(1)
      DO 1000 I=2,N
      SQA=SQA+Q(I)
1000    CONTINUE
      DO 700 I=1,N
      IF(Q(I).LT.1.E-50)Q(I)=0.
700     CONTINUE
      SQP=Q(1)
      DO 1001 I=2,N
      SQP=SQP+Q(I)
1001    CONTINUE
      WRITE(6,27)
27      FORMAT(9H0 TENEURS,///)
      WRITE(6,28) (Q(I),I=1,N)
28      FORMAT(1H ,8E16.9)
      FACOR=SQA/SQP
      DO 1002 I=1,N
      Q(I)=Q(I)*FACOR
1002    CONTINUE
      DO 1003 I=1,N
      J=2*I
      K=J-1
      Q12(J)=0.5*Q(I)
      Q12(K)=0.5*Q(I)
1003    CONTINUE
      L=IFIX(2.*N/5.)
      KN=5-2*N+5*L
      IF(KN)1004,1004,1005
1005    NK=2*N+KN
      NN=2*N+1
      DO 1008 I=NN,NK
      Q12(I)=Q12(2*N)
1008    CONTINUE
      L=L+1
1004    DO 1006 I=1,L
      Q25(I)=Q12(5*(I-1)+5)*0.25
      DO 1007 K=1,4
```

```

      Q25(I)=Q25(I)+0.5*Q12(5*(I-1)+K)
1007  CONTINUE
1006  CONTINUE
      DO 3030 I=1,L
3030  AJ(I)=Q25(L-I+1)
      DO 3031 I=1,L
      Q25(I)=AJ(I)
3031  AJ(I)=0.
C -----
C TRACE DES COURBES
C -----
      WRITE(6,1009)
1009  FORMAT(1H1,40X,'TENEURS, ACCUMULATION SUR 25 CM DE CAROTTE',//)
      WRITE(6,1010)(Q25(I),I=1,L)
1010  FORMAT(07X,10(F6.3,' 0/0'),//)
      WRITE(6,2007)
2007  FORMAT('00000 VALEURS CHIMIQUES',//,'0**** VALEURS CALCULEES')
      DO 2000 K=1,L
      N=K*10
      J=N-9
      DO 2001 M=J,N
      X(M)=FLOAT(M)
      Y(M)=Q25(K)
      Z(M)=CHIM(K)
2001  CONTINUE
2000  CONTINUE
      NC=L*10
      NL=40
      CALL RCRGBB(NC,NL,X,Y,100,X,Z,100)
      WRITE(6,5)IN,IP
5      FORMAT('0TENEURS CHIMIQUES DU FORAGE N.',I3,' ANOMALIE A ',I3,' ME
      *TRES ',/)
      WRITE(6,1010)(CHIM(I),I=1,L)
C -----
C SORTIE DES COURBES SUR DIAPOSITIVES
C -----
      READ(5,8)(TX(I),I=1,3)
8      FORMAT(5A10)
      CALL UGRAF (13.,17.,1,50H.....
1.....,30,TX,39,39HTENEURS, (.,CHIMIQUES, - CALCULEES ),X,Y,
2100,0,1,X,Z,100,-5,-15)
      GO TO 6
2002  STOP
      END
      FUNCTION F1(X)
      COMMON E,B,C
      F1=EXP(-E/COS(X))*COS(X)
      RETURN
      END
      FUNCTION F2(X)
      COMMON E,B,C
      IF(X.EQ.0) GO TO 31
      F2=EXP(-B/SIN(X)+C/COS(X))*COS(X)
      RETURN
31  F2=0.

      RETURN
      END

```


ANNEXE III

GEOLOGIE DU BASSIN DE LODEVE

GEOLOGIE DU BASSIN DE LODEVE

Nous avons emprunté la description géologique du bassin permien de Lodève à J. GARRIC (1965) [1]; G. BRANCHE, Y. CALIFET, J. DEBYSER, C. SCEMAMA, et Institut Français du Pétrole (1964) [2] et à J. GARRIC, J. HERY et P. VETTER (1962) [3].

I - MORPHOLOGIE

Le bassin permien se présente en une structure monoclinale régulière à pendage Sud faible dans l'ensemble (10 grades sur sa plus grande partie). Il s'appuie au Nord d'une part sur la ride cambrienne de Lodève dans la partie Est et, d'autre part, sur l'anticlinal antécambrien du Mendic dans la partie Ouest, sur lesquels les pendages se relèvent jusqu'à 50 grades.

C'est aussi un bassin au sens propre du terme. En effet, le Permien doit s'étendre plus loin vers le Sud dans le fossé de Bédarieux.

II - LE SOCLE DE LA RIDE DE LODEVE

Le socle antépermien affleure en bordure Nord du bassin, principalement à l'Est de Lodève, suivant un chaînon Est-Ouest de 10 km de long sur 4 à 5 km de large. Ce chaînon s'enfonce vers l'Est sous le Permien et le Trias, et vers l'Ouest sous le Trias seulement. La crête dénudée avoisinant 400 m est marquée par une formation volcano-sédimentaire jalonnant une grande faille post-permienne et antétriasique qui souligne le passage de l'Antécambrien au Nord, du Cambrien au Sud.

La lithologie antépermienne peut être résumée comme suit :

Antécambrien :	schistes verts, grès à séricite, calcaires dolomitiques,
Cambrien :	dolomies (400 m), schistes (100 m), calcaire dolomitique (300 m), schistes verts (400 m), quartzite (100 m).

III - LES ETAGES PERMIENS

Les terrains permien reposent en discordance à l'Ouest à la fois sur le Houiller de Graissessac et le socle antécambrien, et au Nord-Est à la fois sur l'Antécambrien et le Cambrien.

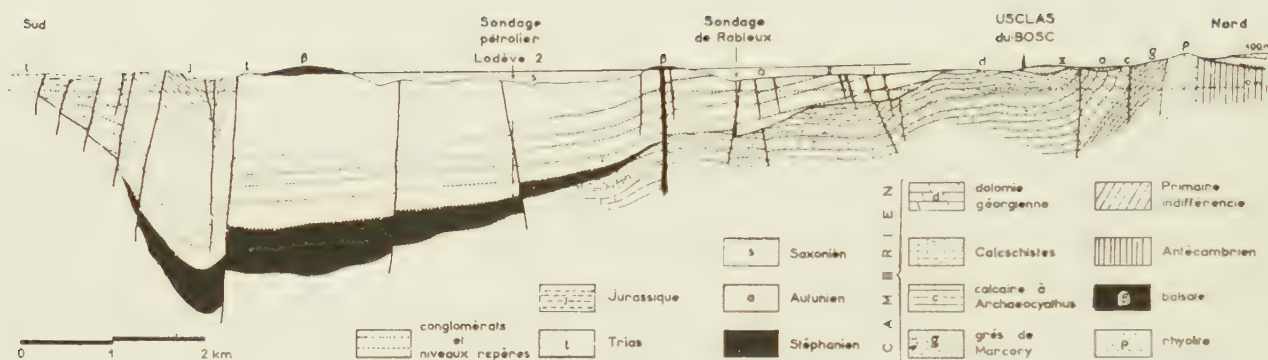
Les niveaux de la base de couleur grise à noir appartiennent à l'Autunien supérieur (assise de Millery).

Les formations autuniennes typiquement grises ne se voient qu'en bordure de la ride de Lodève sur une largeur de 1 à 3 kilomètres.

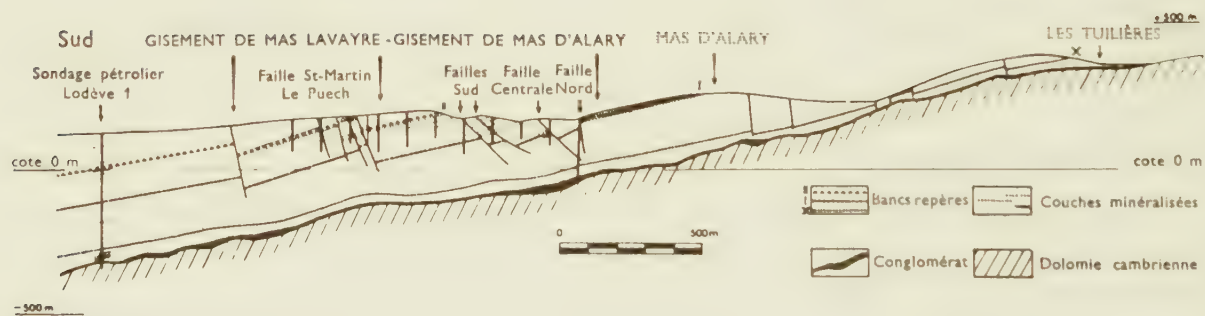
Au-dessus, des formations rouges apparaissent, couvrant plus des trois quarts de la surface du bassin. Elles sont peu fossilifères.

L'ensemble constitue le faciès si caractéristique du "Lodévien" classé dans l'étage Saxonien. L'étage Thuringien est absent.

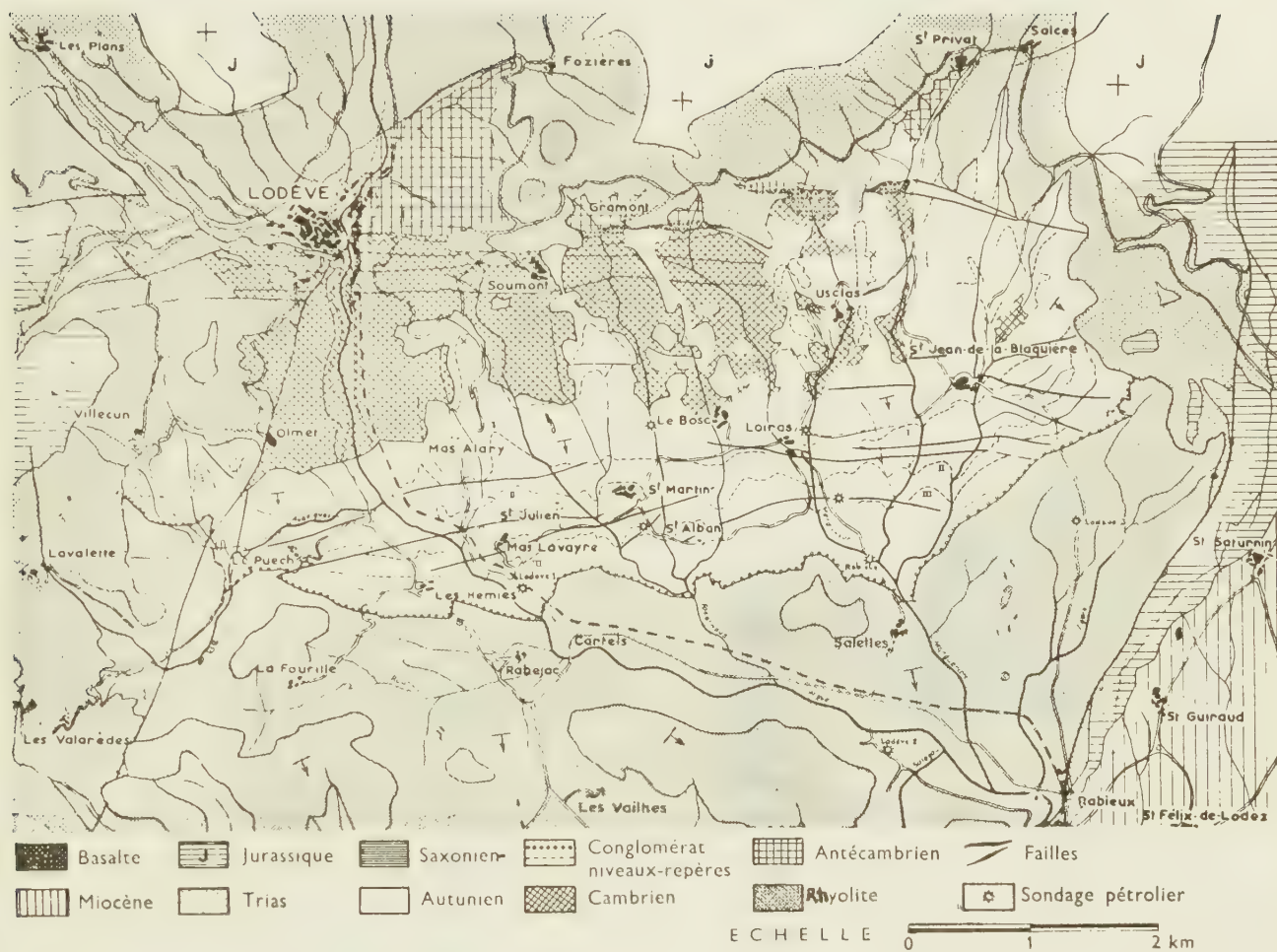
Les étages permien sont recouverts en discordance par des formations triasiques presque horizontales, sur toute la bordure Nord et localement sur la bordure



Coupe géologique du Bassin Permien de Lodève



Coupe suivant l'axe du "Golfe" de Mas d'Alary



Le bassin permien de Lodève

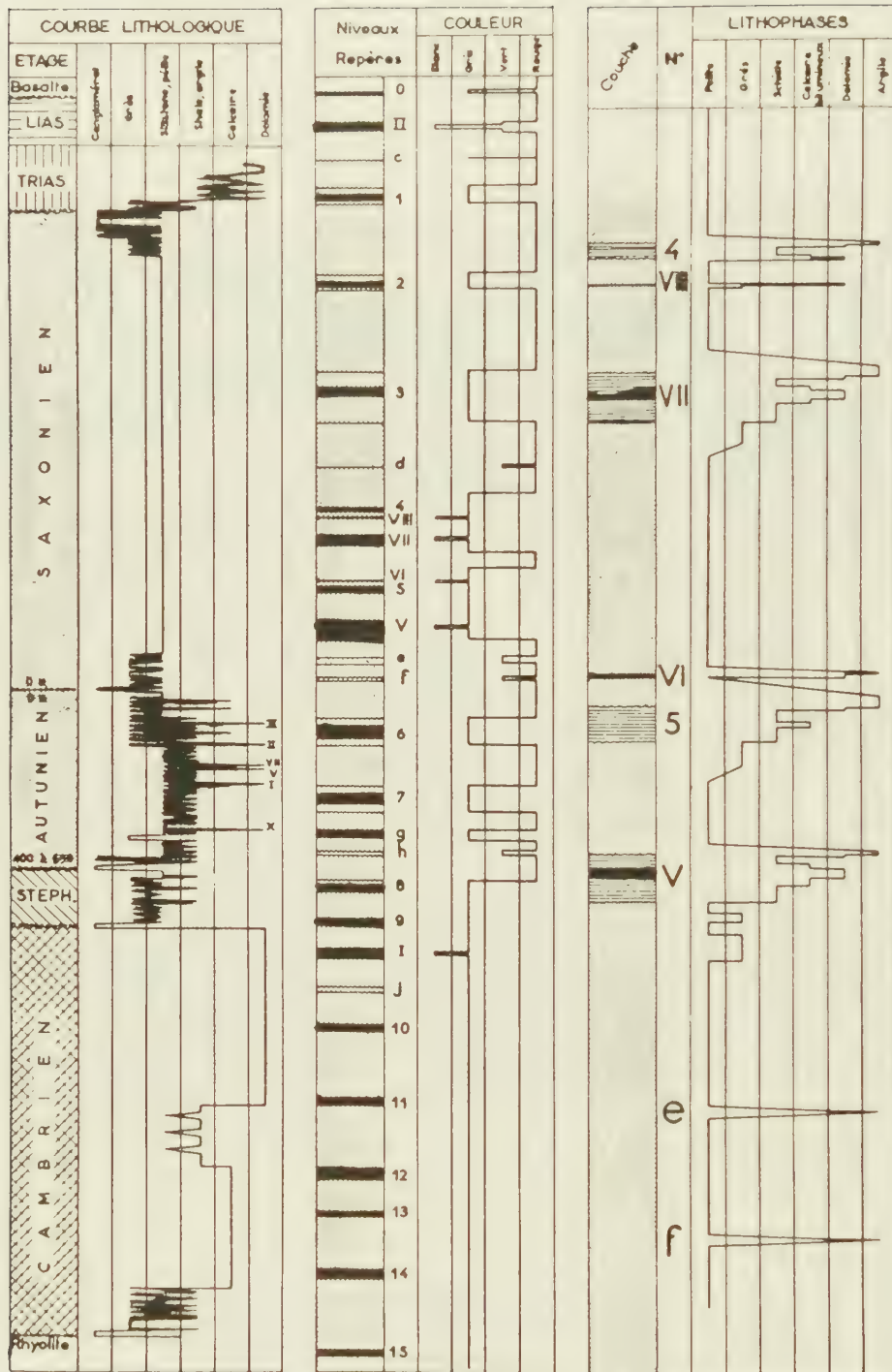


Figure C - Coupe et analyse stratigraphique du permien de Lodève

Sud. Elles débutent par un conglomérat quartzeux caractéristique.

Le Permien est donc stratigraphiquement bien délimité.

Par contre la limite entre les deux étages Autunien et Saxonien est indéterminée par suite du manque de fossiles caractéristiques d'une part, et d'autre part, par suite des répétitions de faciès gris et de faciès rouges dans une zone de transition de 300 mètres d'épaisseur.

Conventionnellement la limite a été fixée au-dessus de cette zone mixte à un niveau conglomératique concordant, réalisant un excellent repère dans tout le bassin.

Le matériel permien, dans son ensemble peut être défini comme une pélite gréso-dolomitique.

IV - STRATIGRAPHIE ET PALEOGEOGRAPHIE

La stratigraphie est donnée par la coupe A et la figure C. On peut en reconstituer comme suit l'évolution paléogéographique :

Le bassin de Lodève a pris naissance dans une vaste plaine aisément inondable de la surface hercynienne alors très aplanie. Le bassin était certainement sans débouché vers la mer. Avec la montée constante des eaux, tous les reliefs de faible altitude ont été submergés.

Au début le bassin était un marécage. Dans les étangs le milieu était eutrophique, les vases étaient riches en matière organique et en carbonates dissous, réalisant au fond un milieu euxinique.

Au lac très calme, oligotrophique, succédait périodiquement un marécage instable où la vie devenait exubérante : vers de vase, amphibiens reptiles sur les sols exondés. Au plus profond de ces lacs temporaires, le milieu demeurait encore euxinique et réducteur tandis que dans les marécages les périodes de sécheresse se succédaient et le milieu devenait oxydant. Les carbonates cristallisaient à la façon des évaporites dans les sols argileux desséchés et la pélite fondamentale virait du gris au rouge.

V - ORIGINE DES TERRES ROUGES

D'après les études paléobotaniques et sédimentologiques du Permien d'Europe, on admet généralement à l'Autunien une prolongation du climat du Carbonifère (climat tropical humide mais à saisons alternées), alors qu'on a tendance à voir au Saxonien les signes d'un climat tropical plus sec qui sera celui du Thuringien. Au Stéphanien une sécheresse relative était déjà remarquée.

Les observations faites dans le bassin de Lodève confirment ce climat de transition.

1° - L'apparition précoce de dolomite dans le lac,

- soit en lits millimétriques alternés avec les silts dans la pélite schisteuse,
- soit en bancs alternés avec la pélite fondamentale,

s'explique par un climat à saison sèche marquée comme dans les lacs dimictiques des régions tropicales.

2° - La précipitation périodique de carbonates en croûte à la surface des sols

exondés peut indiquer un enrichissement des eaux en sels dissous, soit des saisons sèches plus longues vers le milieu de l'Autunien.

3° - La fréquence de plus en plus grande des sols desséchés à la fin du Saxonien peut être la conséquence d'une pluviosité moindre dans l'aire d'érosion comme dans l'aire d'accumulation.

L'origine des séries rouges est très controversée.

La couleur rouge de la pélite saxonnienne est due à la prédominance de l'hématite. On attribue généralement la formation de l'hématite à partir des solutions ferrugineuses provenant principalement de la décomposition des minéraux ferromagnésiens. Sous le climat tropical humide, les hydrates de fer libérés pendant la saison humide se fixent par dessiccation autour des grains sous forme d'hématite pendant la saison sèche. L'hématite peut également se former par précipitation en milieu aqueux.

Son accumulation sur une puissance considérable pendant le Saxonien peut s'expliquer à la fois :

- par un milieu d'érosion de sols rouges formés sous un climat équatorial, moins pluvieux qu'à l'Autunien et à saison sèche plus marquée,
- par un milieu de sédimentation nettement oxydant permettant, non seulement la conservation de l'hématite détritique, mais aussi la cristallisation à partir de gels ferriques précipités dans le lac.

Si les conditions oxydantes n'étaient pas prédominantes, ce qui était la règle en l'absence d'apports terrigènes dans le lac, les hydrates de fer précipitaient avec les argiles à l'état ferreux, comme le montrent les innombrables sols desséchés gris du Saxonien.

On peut se demander si les sédiments qui ont constitué la pélite fondamentale de l'Autunien gris étaient bien gris à l'origine. Ne doivent-ils pas leur couleur actuelle au milieu réducteur régnant dans le lac au moment du dépôt ? Le fer aurait cristallisé sous forme de pyrite et d'ankérite principalement.

VI - TECTONIQUE DU GISEMENT

La stratigraphie a été résumée ci-dessus.

Les principaux accidents qui traversent le district de Mas d'Arlary traduisent, malgré la nature généralement plastique du matériel permien, une tectonique de style cassant dont nous allons examiner les caractéristiques.

La direction de la presque totalité des failles se situe entre Est et E.N.E., c'est-à-dire à peu près identique à la direction des affleurements de la série autunnienne. Cette direction correspond aussi, d'ailleurs, aux anciennes directions tectoniques des terrains redressés du Cambrien sous-jacent. Les principaux accidents se groupent en faisceaux de failles plus ou moins parallèles qui se relaient entre elles. On en compte trois groupes dans le district de Mas d'Alary (figure D).

Le pendage général de ces failles va de la verticale à 50 grades vers le Nord. Le plus souvent le plan des failles est de 70 à 75 grades par rapport à la verticale, c'est-à-dire sensiblement perpendiculaire à celui de la stratification. Les failles à pendage Sud sont très rares.

Les rejets, calculés suivant la faille, sont très variables et peuvent aller de quelques décimètres jusqu'à 50 m pour un même accident ; l'ensemble d'un faisceau groupant plusieurs failles peut avoir un rejet beaucoup plus important ; jusqu'à

100 m au maximum.

Le mouvement de ces failles traduit le plus souvent un effondrement relatif vers le Nord des compartiments Nord, les effondrements relatifs vers le Sud étant à la fois moins fréquents et moins importants.

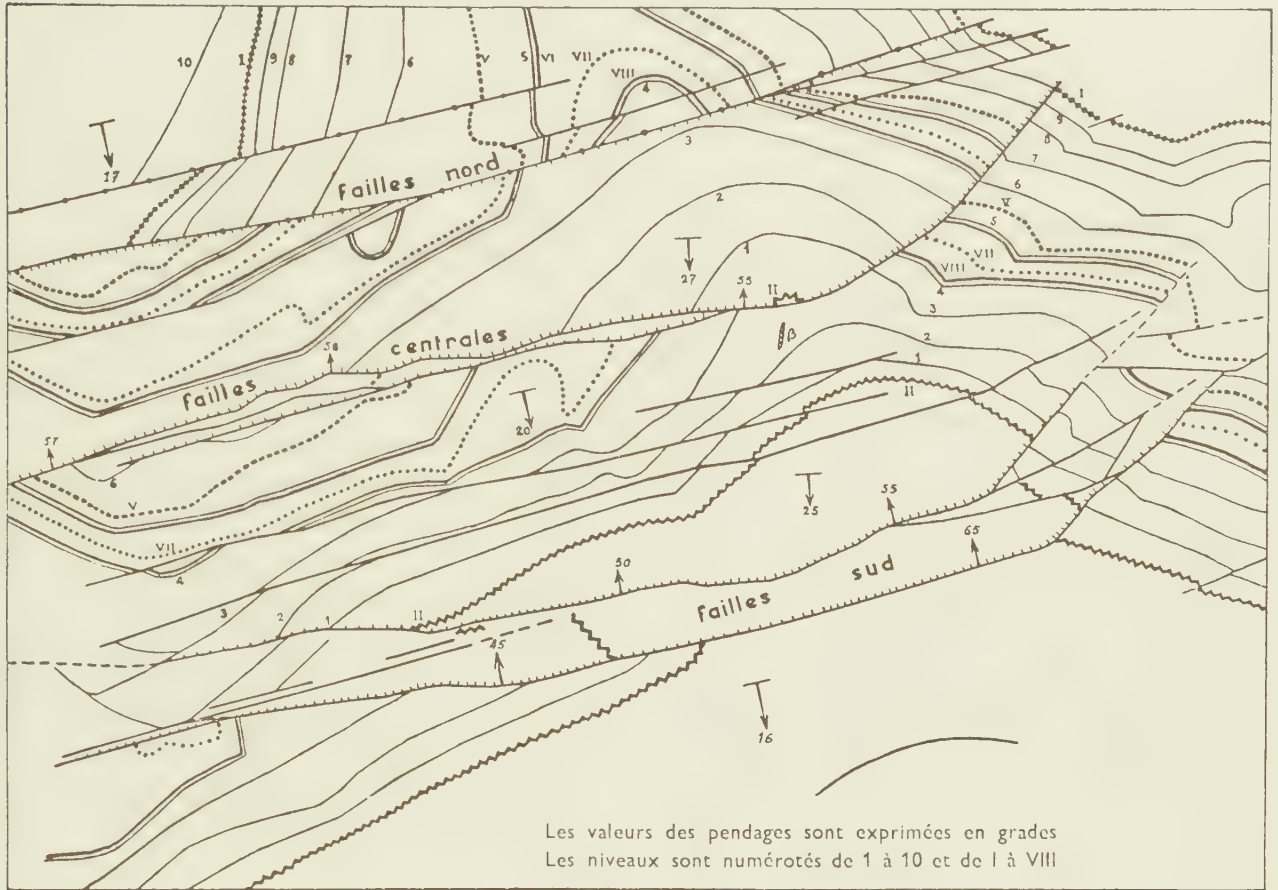


Figure D - Gisement de Mas d'Alary - Géologie et tectonique.

Structure du gisement

Le faisceau tectonique de Mas d'Alary se décompose, dans le gisement et dans une partie de ses extensions, en trois grandes failles principales ou groupe de failles découpant deux caissons secondaires (figure D).

Au nord, la "grande faille Nord" à mouvement effondrant vers le Sud et à pendage subvertical. Son rejet varie de quelques mètres à l'Est à 50 m à l'Ouest. Elle constitue, en fait, la limite vers le Nord du gisement de Mas d'Alary.

Au centre, les "failles centrales" à effondrement et pendage Nord de 50 grades, possèdent un rejet de 50 m à peu près constant sur 2 km.

Au Sud, les "failles Sud" dont les caractéristiques globales sont les mêmes que pour les failles centrales : rejet de 40 m environ et pendage Nord. Toutefois il y a deux failles principales de même direction et pendages, dites "failles Sud toit" (figure E) au Nord et "failles Sud mur" au Sud. Elles se relaient sur toute la longueur du gisement, le rejet se portant progressivement sur la faille mur vers l'Ouest, tandis que la faille toit s'amortit.

En somme, le gisement de Mas d'Alary se présente comme une zone tectonique-

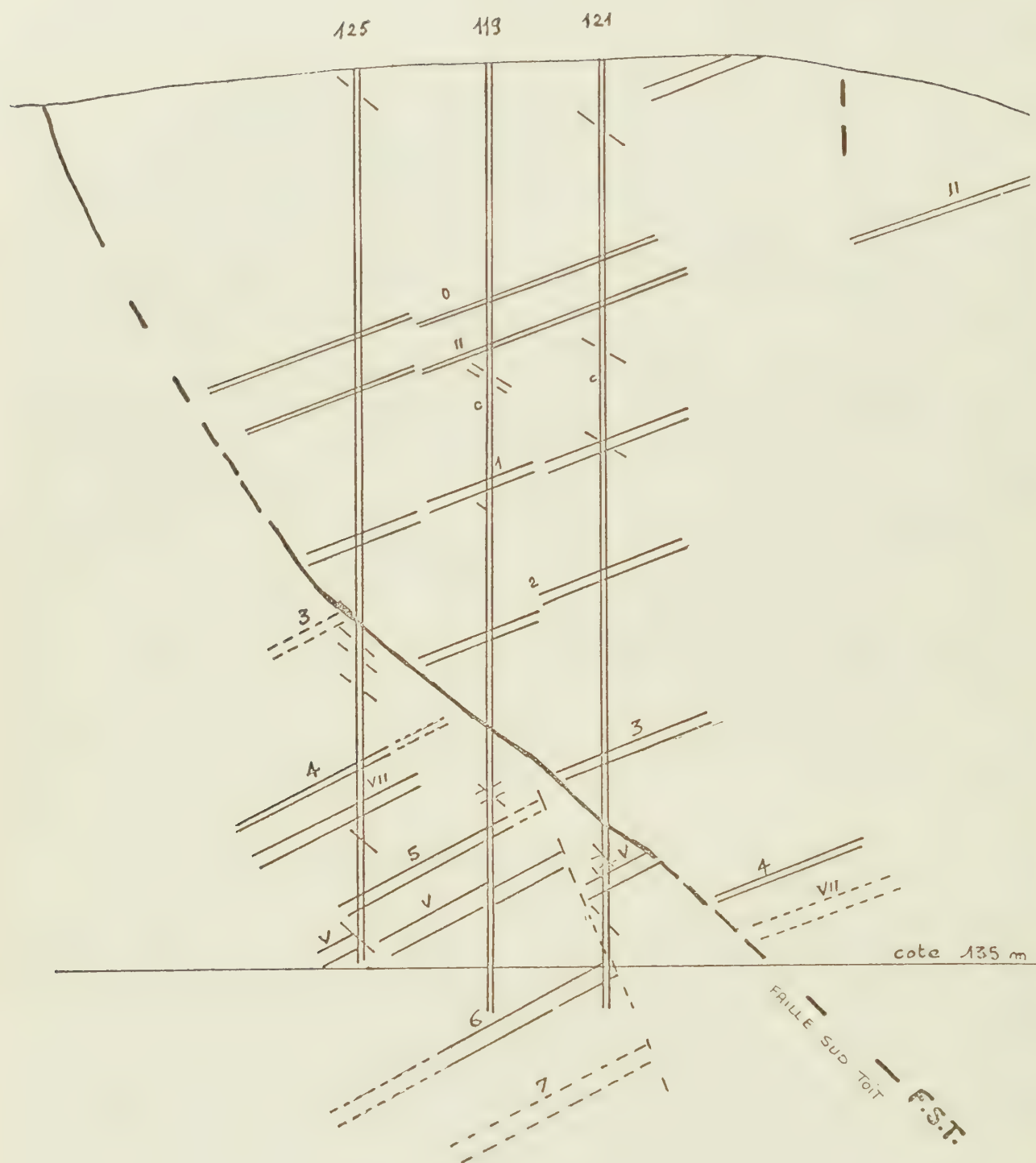


Figure E - Coupe du puits 119 (Les lettres et N^{os} sont explicités figure C).

ment déprimée en "touche de piano", les deux failles, centrales et Sud, étant donné leurs pendages, devraient rejoindre "en coin", vers la profondeur, la faille Nord qui les compense partiellement. Le comportement exact de ces failles vers la profondeur n'est pas encore connu.

La minéralisation uranifère [4]

C'est dans la série autunienne principalement que la minéralisation uranifère se rencontre, strictement localisée dans ces niveaux lithologiquement différenciés. L'uranium y est généralement lié à la matière organique, le plus souvent en fins lits, plus rarement en filonnets recoupant la stratification.

Tantôt la matière organique a évolué vers un protopétrôle non uranifère, tantôt vers un matériau carboné souvent minéralisé : carburane, tucholite avec exceptionnellement de la pechblende. D'autres métaux à teneurs non négligeables sont liés à l'uranium dans la matière organique : le molybdène s'y trouve sous une forme indéterminée minéralogiquement, le plomb sous forme de galène, le zinc sous forme de blende, et le cuivre sous forme de chalcopyrite.

L'uranium ne peut être décelé le plus souvent que par sa radioactivité, cependant sur les indices riches on peut observer des minéraux d'altération, principalement des arséniates et des silicates. Des espèces, nouvelles pour la France y ont été récoltées abondamment, notamment des molybdates et des carbonates.

La minéralisation uranifère est loin d'être aussi constante que la couche qui la porte ; néanmoins sur toute l'étendue du bassin, certaines couches apparaissent plus favorables. C'est dans la série moyenne de l'Autunien et à 2 ou 3 km de la bordure du socle qu'apparaissent des plages radioactives dont la configuration dépend étroitement de la topographie et de la tectonique (figure F). Ce sont de l'Ouest vers l'Est, les indices de VILLECUN, du PUECH, de Mas d'Alary et des environs de SAINT JEAN de LA BLAQUIERE.

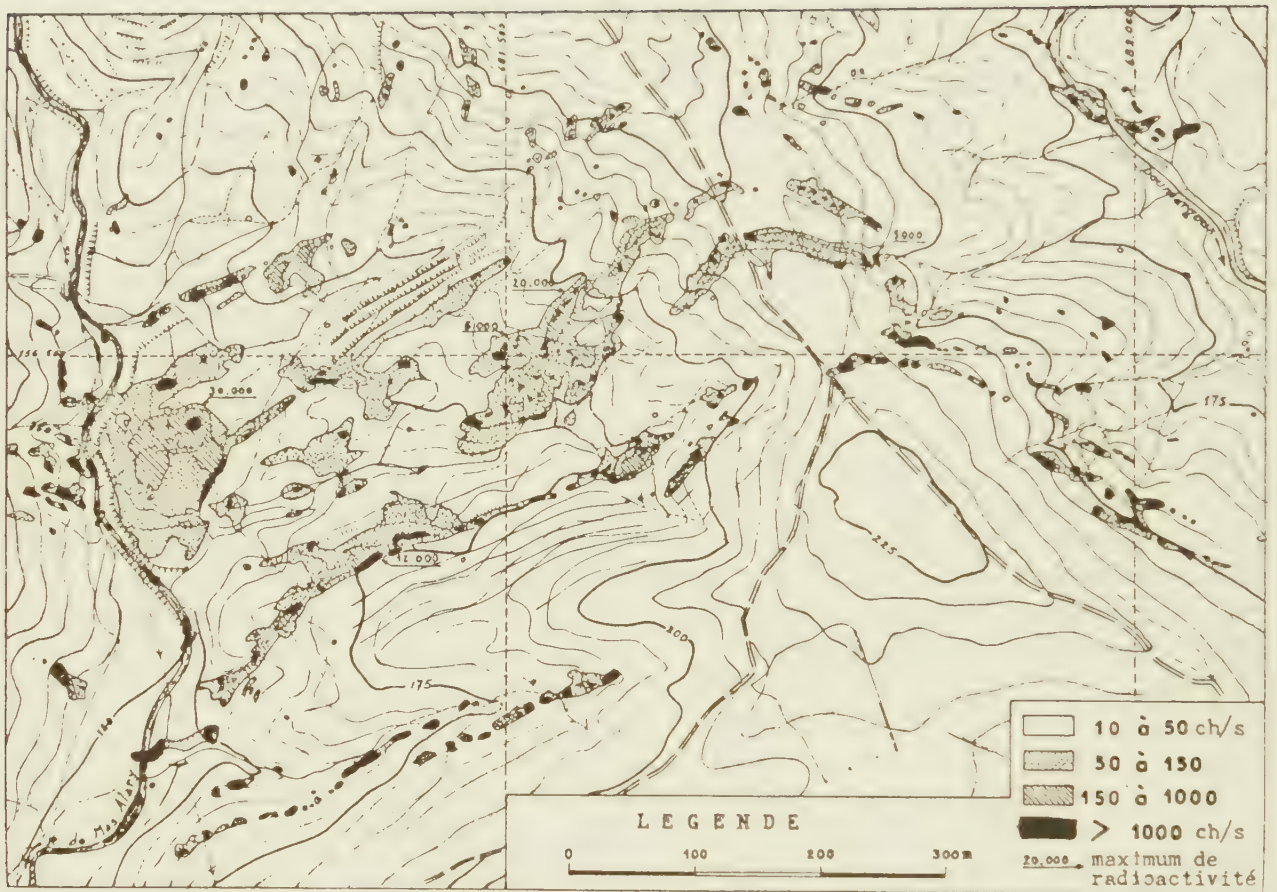


Figure F - Mas d'Alary - Radiométrie

Bibliographie de l'Annexe

- [1] GARRIC J.
L'uranium dans le Carbonifère et le permien de l'Hérault.
Les minerais uranifères français, 2ème volume, tome 3, p. 163, Presses
Universitaires de France, 1965.

- [2] BRANCHE G., CALIFET Y., DEBYSER J., SCEMAMA C. et IFP, Rueil-Malmaison
Observations sédimentologiques et géochimiques sur le bassin Permien de
Lodève.
INTERNATIONAL REVIEW OF MONOGRAPHY IN EARTH SCIENCES, Vol. 24, "Advance in
organic Geochemistry 1964" - Geochimica et Cosmochimica Acta.

- [3] GARRIC J., HERY B., VETTER P., 1962
Compte-rendu 5ème Congrès de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère,
9-12 Sept. 1963, tome I, p. 63-91.

- [4] LENOBLE A.
Caractères Géologiques de trois nouveaux gisements français d'uranium.
Bulletin d'informations scientifiques et techniques, n° 59, mars 1962.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] COULOMB R.
Traitement automatique par ordinateur des radiocarottages
DP/DRM, Service Géotechnique, RC/CR/N° 1077, 17.8.66
- [2] COULOMB, DESGEANS, LE QUAND, SALICHON
CEA N 1279
- [3] CZUBEK J.A.
Natural selective gamma logging A new log of direct uranium determination
Nukleonika, 13, n° 1 (1968) 89-105
- [4] CZUBEK J.A., DUMESNIL P.
Radiocarottage gamma naturel sélectif - Communication du Colloque de
l'A.I.E.A., Buenos-Aires, 4-9 Nov. 1969, Réf.SM 112/16
- [5] CZUBEK J.A.
Pulsed neutron method for uranium well logging
Institute of Nuclear Physics, Cracow, Report n° 732/PH, 1971
- [6] CZUBEK J.A., DUMESNIL P., ANDRIEUX C., 1970
Detailed description of the pulse neutron experiment.
SES/ERA/AI/72 R 13, 20 mars 1972
- [7] CHERVET J., COULOMB R.
Comportement géochimique de l'uranium dans le cycle d'altération. Deuxième
Conférence Internationale des Nations-Unies sur l'utilisation de l'énergie
atomique à des fins pacifiques, Tome 2, p. 75
- [8] COULOMB R.
Communication personnelle
- [9] BLALOCK T.U.
A low-noise charge sensitive preamplifier with a field effect transistor
in the input stage
IEEE Transactions on nuclear science, vol, NS 11, June 1964, n° 3, pp. 365-372

- [10] HOCLET M.
Précision et étalonnage en énergie d'une chaîne de spectrométrie gamma
Rapport CEA R 4199, 1971, pp. 58 à 69.
- [11] CZUBEK J.A.
Application du principe de similitude à la mesure gamma-gamma de densité
Rapport CEA R. 3099, 1966, pp. 15-19
- [12] DHANOV
Méthodes radiométriques de recherches et d'études des minerais d'uranium
Moscou, 1957, pp. 436-450
- [13] RHODES D.F., STALLWOOD R.A., MOTT W.E.
Intensity of unscattered gamma rays inside cylindrical self-absorbing sources
Nuclear Science and Engineering, 9 (1961), pp. 41-46
- [14] CZUBEK J.A.
Possibilités d'interprétation de radiocarottage gamma naturel sélectif
Rapport CEA R 4061, 1970, p. 19
- [15] SLAMA J.P.
Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay-aux-Roses (Section des réserves)
Communication personnelle
- [16] HUBELL J.P.
Photon cross sections, attenuation coefficients and energy absorption
coefficients from 10 keV to 100 GeV.
NSRDS-NBS, 29 august 1969
- [17] CZUBEK J.A.
Neutron method in geophysics
Nuclear Techniques and Mineral Resources
I.A.E.A. Vienna, 1969, SM 112/5
- [18] STUCK R., PONPON J.P., SIFFERT P.
Behavior of high Purity Germanium nuclear counters at low temperature
Applied Physics Letters, volume 19, n° 11, 1 décembre 1971
- [19] ZANIO K.
Characterization of semi-insulating Cd Te by nuclear methods
Proceeding of the international symposium on cadmium telluride
Strasbourg, June 29-30, 1971, XXI-1
- [20] EBERHARDT, RYAN R.D., TAVENDALE A.J.
Evaluation of epitaxial n Ga As for nuclear radiation detection
Nuclear Instruments and Methods, 9K (1971) 463-476

- [21] DUMESNIL P., ANDRIEUX C.
Spectrométrie gamma dans les forages par sonde à semi-conducteur Ge Li
Industries Atomiques 11/12 : 1970, p. 34

- [22] DUMESNIL P., ANDRIEUX C., LENDA A.
Interprétation des mesures spectrométriques effectuées dans les forages
par sonde Ge Li
CEA Bulletin d'Instrumentation Nucléaire n° 43, mars 1971, p. 15.

Manuscrit reçu le 5 décembre 1972

Vu et approuvé
PARIS, le 3 juillet 1972
Le Président
de l'Université de PARIS VI

A handwritten signature in dark ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned below the printed text.

